



Departamento de Enxeñaría
Naval e Oceánica
Escola Politécnica Superior
UNIVERSIDADE DA CORUÑA

TESIS DOCTORAL

**SOBRE LA AUTOMATIZACIÓN
DEL DISEÑO EN APLICACIONES
FLUIDODINÁMICAS MEDIANTE
TÉCNICAS EVOLUTIVAS**

Vicente Díaz Casás

Directores:

Fernando López Peña

Richard J. Duro Fernández



Departamento de Enxeñería
Naval e Oceánica
Escola Politécnica Superior
UNIVERSIDADE DA CORUÑA

D. Fernando López Peña, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Enxeñería Naval e Oceánica de la Universidade da Coruña,

D. Richard J. Duro Fernández, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Computación de la Universidade da Coruña,

CERTIFICAN:

Que la memoria titulada “Sobre la automatización del diseño en aplicaciones fluidodinámicas mediante técnicas evolutivas” ha sido realizada por D. Vicente Díaz Casás bajo nuestra dirección en el Departamento de Enxeñería Naval e Oceánica de la Universidade da Coruña, y constituye la Tesis que presenta para optar al grado de Doctor.

Fdo. Fernando López Peña
Codirector de la Tesis Doctoral

Fdo. Richard J. Duro Fernández
Codirector de la Tesis Doctoral

Agradecimientos

A María, a mi hermana preferida, mis padres y toda mi familia, por aguantarme y apoyarme todos estos años, este es el fruto de tantas horas de ausencia.

A Fernando y Richard por contar conmigo para este proyecto. Sin vosotros esta tesis no habría sido posible.

A todos los que están y han pasado por el GII, por vuestra ayuda y compañía durante todas las horas que hemos compartido, esta tesis es también vuestra.

A esa gente “especial” que sois mis amigos, por estar ahí y darme ánimos todos estos años.

A todos de los que he aprendido a lo largo de estos años. Especialmente tengo que agradecer su ayuda a todos aquellos que me habeis “acogido” para realizar parte de este trabajo y proporcionandome nuevas perspectivas, Alfredo Bermúdez de Castro, María Luisa Seoane, Marco Mulas, Richard R.G. Flay y David Le Pelley.

A todos vosotros, gracias

Índice general

Resumen	1
Publicaciones	5
Introducción	7
Objetivo y Metodología	17
1. Diseño automático y optimización fluidodinámica	21
1.1. El Proceso de diseño	22
1.1.1. Etapas del proceso de diseño	23
1.2. El diseño automático	29
1.3. Optimización fluidodinámica	30
1.3.1. Simulación fluidodinámica	34
1.4. Entorno automático de diseño para la optimización fluidodinámica . .	36
2. El problema fluidodinámico	39
2.1. Ecuaciones de Navier - Stokes	40
2.2. Leyes de comportamiento	42

2.3. Modelo de fluido incompresible	42
2.3.1. Flujos no viscosos: Ecuaciones de Euler	43
2.3.2. Ecuaciones de Navier Stokes promediadas. Energía cinética turbulenta y tasa de disipación	43
2.4. Selección del modelo	48
3. Estrategia de búsqueda	49
3.1. Introducción	49
3.2. Algoritmo genético canónico	51
3.3. Diseño de aerogeneradores mediante algoritmos genéticos canónicos	56
3.3.1. Simulador	58
3.3.2. Definición de la pala	68
3.3.3. Parámetros del algoritmo genético	69
3.4. Mejoras en el proceso de búsqueda	72
3.4.1. Algoritmos macroevolutivos	74
3.5. Diseño de aerogeneradores mediante algoritmos macroevolutivos . . .	78
3.5.1. Comparación con el óptimo analítico	78
3.5.2. Cálculo estructural	81
3.5.3. Experimento	82
3.6. Conclusiones sobre el proceso de búsqueda	90
4. Simulador numérico	93
4.1. Método de volúmenes finitos	94

4.1.1.	Formulación conservativa de las ecuaciones de Navier-Stokes	97
4.2.	Resolución numérica	98
4.2.1.	Cálculo de la velocidad	98
4.2.2.	Cálculo de la presión	100
4.3.	Implementación - La biblioteca OpenFOAM	101
4.3.1.	Estructura básica de programación en OpenFOAM	101
4.4.	Optimización de hidrodinámica de timones	103
4.4.1.	Simulador numérico	105
4.4.2.	Generación de la malla	106
4.4.3.	Caracterización del timón	107
4.4.4.	Resultados	109
4.4.5.	Conclusiones del experimento	110
4.5.	La generación de la malla	112
4.5.1.	Definición y validez de la malla	113
4.5.2.	Estrategia de desplazamiento de malla	115
4.6.	Diseño de la transición entre conductos de distinto diámetro	120
4.6.1.	Resultados	123
4.7.	Problemas bifásicos	125
4.7.1.	El modelo bifásico	125
4.7.2.	Resolución de las ecuaciones	126
4.8.	Optimización hidrodinámica de las formas de carena	130
4.8.1.	Definición del experimento	132

4.8.2. Resultados	136
4.8.3. Conclusiones del experimento	137
4.9. Conclusiones a la aplicación proceso de modificación del mallado . . .	139
5. Diseño óptimo de velas de competición	141
5.1. Estructura del proceso de evaluación	142
5.2. Definición de la superficie de la vela	143
5.3. Generación de la malla - Método de inmersión de frontera	145
5.3.1. Método de la celda fantasma	147
5.4. Simulación numérica	150
5.4.1. Análisis comparativo de los distintos modelos aerodinámicos .	151
5.4.2. Corrección mediante redes neuronales artificiales	158
5.5. Optimización de las velas de la clase tornado	162
5.5.1. Proceso de decodificación	165
5.5.2. Corrección del simulador	167
5.5.3. Optimización de la vela mayor	171
5.5.4. Optimización conjunta de mayor y foque	173
5.6. Conclusiones al proceso de optimización del velas	177
6. Problemas multiobjetivo	181
6.1. NSGA-II	182
6.2. Optimización de perfiles hidrodinámicos	187
6.2.1. Simulador	188

6.2.2. Resultados	188
6.3. Conclusión	193
7. Entorno automático de diseño óptimo en fluidodinámica	195
7.1. Proceso de búsqueda	196
7.1.1. Algoritmo genérico canónico	197
7.1.2. Algoritmos macroevolutivos	197
7.1.3. NSGAI	198
7.2. Evaluación de alternativas	199
7.3. Decodificación del individuo	200
7.3.1. Generación de malla	202
7.3.2. Deformación de la malla	203
7.3.3. Métodos de inmersión de frontera	204
7.3.4. Selección del proceso de mallado	204
7.4. Procedimiento de diseño	205
8. Conclusiones	207
9. Líneas futuras de trabajo	213
Referencias	228

Resumen

En esta tesis se estudia la automatización del proceso de diseño óptimo fluido-dinámico combinando el análisis del uso de métodos estocásticos de búsqueda de soluciones, principalmente técnicas evolutivas, con herramientas de análisis basadas en simulación numérica computacional en mecánica de fluidos. Puesto que estos dos campos de conocimiento son totalmente diferentes, la automatización no puede abordar cada uno de estos procesos separadamente. Por este motivo se establecen sistemas de comunicación e interrelación entre ambos.

Las características propias de los problemas abordados llevan a que este estudio no se circunscriba al uso de un simulador concreto, sino que se desarrolla un sistema de diseño abierto de tal forma que permita su integración con diversos simuladores y procesos de evaluación. Además, con el objetivo de mejorar los resultados de estos simuladores, manteniendo un coste computacional reducido, se combina la simulación numérica con ensayos experimentales y correcciones basadas en redes neuronales artificiales.

Los resultados de este trabajo se plasman en el desarrollo de una estructura para el diseño óptimo automático en problemas de ingeniería en fluidodinámica. Esta estructura se construye de manera acumulativa a lo largo de esta tesis mediante su aplicación a casos prácticos cuidadosamente seleccionados. De esta forma, con la evaluación de cada caso se añade una nueva funcionalidad o mejora de un módulo de la estructura propuesta. Con todo lo anterior, se desarrolla una metodología de aplicación en la industria que se ha plasmado en soluciones a problemas reales. Entre otros, se pueden destacar los problemas de diseño óptimo de velas de navegación, aerogeneradores y formas de carena.

Palabras clave: Mecánica de fluidos, optimización, diseño automático, algoritmos evolutivos.

Abstract

This thesis explores the automation of the optimal design process in fluid dynamics by combining the use of stochastic solution searching methods, particularly evolutionary techniques, with analysis tools based on computational fluid mechanics simulation. Since these two fields of knowledge are completely different, the automation of these processes can not be addressed separately. For this reason some systems for relating and communicating them are established.

The variety of the problems to be solved do not allow the use of a single simulator, instead an open design system is proposed for its integration with different simulators and evaluation processes. Moreover, aiming at improving the performance of these simulators, while preserving their computational cost as low as possible, numerical simulations are combined with experimental results and artificial neural network based corrections.

An environment for the automatic optimal design in fluid dynamic engineering problems is developed as a result of this study. It is incrementally constructed through its iterative application to selected test cases. Therefore, by evaluating each test case new functionalities and improvements are added. In addition, a methodology for implementing it in industrial problems is developed. Some examples of these are the optimal design of sails, wind turbines or hull shapes.

Key Words: Fluid dynamics, optimization, automatic desing, evolutionary algorithms

Publicaciones

El trabajo realizado en esta tesis ha generado las siguientes ponencias y artículos:

■ Año 2005

- Díaz Casás, V., Lopez Peña, F., Lamas, A. and Duro, R.J., *An Evolutionary Environment for Wind Turbine Blade Design*. Lecture Notes in Computer Science, 3512:1188-1196, 2005.
- Díaz Casás, V., Duro, R.J. and Lopez Peña, F., *Evolutionary Design of Wind Turbine Blades*. International Scientific Journal of Computing, 4:49-55, 2005.
- Díaz Casás, V., Lopez Peña, F. and Duro, R.J., *Automatic Aerodynamic Design of a Wind Turbine through Evolutionary Techniques*. 3rd IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 2005.

■ Año 2006

- Díaz Casás, V., Duro, R.J. and Lopez Peña, F., *Automatic Design and Optimization of Wind Turbine Blades*. International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2006.

■ Año 2007

- V. Díaz Casás, Marcos Miguez Gonzalez, Fernando López Peña, Richrad Duro Fernández, *Diseño automático mediante técnicas evolucionistas en problemas de optimización aerohidrodinámica de ingeniería naval*, Actas Jornada Técnica "La Ingeniería y el Diseño Naval", 2007.

- Becerra, J.A., Díaz Casás, V. and Duro, R.J., *Exploring Macroevoolutionary Algorithms: Some Extensions and Improvements*. Lecture Notes in Computer Science, 4507:308-315, 2007.
 - V. Díaz Casás, F. Lopez Peña, R. J. Duro, *Sail Optimization through Evolutionary Algorithms*, Proceeding of Second OpenFOAM Workshop, 2007.
 - R.J. Duro, V. Díaz Casás, F. López Peña, *Automatic Aerodynamic Design through Evolutionary Techniques*. Proceedings of the 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference (FEDSM2007), 2007.
 - V. Díaz Casás, F. Lopez Peña, R. J. Duro, *Mesh Modification Strategy for Aerodynamic Design through Evolution*. Proceedings of 2007 IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, 2007.
 - V. Díaz Casás, *Diseño automático y simulación en optimización de formas*. Jornada sobre Modelado y Simulación numérica aplicados a la Ingeniería, 2007.
- **Año 2008**
- Vicente Díaz Casás, Fernando López Peña, Marcos Míguez González, Richard J. Duro, *Algoritmos Evolutivos y Simulación Numérica en Problemas de Optimización Hidrodinámica*, Ingeniería Naval, 858:100-107, 2008.
 - V. Díaz Casás, P. Porca Belío, F. Lopez Peña, R.J. Duro, *Wind Tunnel Corrections for a Low Cost Simulator in an Evolutionary Sail Optimization Enviroment*. Proceedings of World Congress on Engineering and Computer Science, 2008.
 - Fernando López Peña, Vicente Díaz Casás, Richard J. Duro, *Automatic aerodynamic and hydrodynamic design based on simulation and evolution*. Proc. of Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation, 2008.

Introducción

El objetivo fundamental del trabajo que se recoge en esta memoria es el estudio de la automatización del proceso de diseño en problemas de optimización fluidodinámica. Como resultado de este estudio se ha desarrollado una estructura de diseño automático, basado en técnicas evolutivas, de aplicación a este tipo de problemas. El desarrollo de este entorno ha ido parejo a su aplicación a problemas reales de ingeniería resueltos mediante la metodología desarrollada.

El diseño [1] puede definirse como ” *El proceso de aplicar las diversas técnicas y principios científicos con el objeto de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficiente detalle para permitir su realización*”. La necesidad de la automatización de este proceso surge de la cada vez mayor demanda tecnológica de la industria, que requiere mejores productos en un menor tiempo y con un menor coste. Para conseguir esto no es suficiente establecer una adecuada metodología para el proceso de diseño sino que, además, ésta ha de integrarse con los más potentes sistemas computacionales de cálculo y simulación.

Entre las diversas aplicaciones del diseño de ingeniería, este trabajo se centra en el estudio de los que tienen por objetivo la obtención de sistemas óptimos en el ámbito aero/hidrodinámico. En este punto es necesario diferenciar claramente entre el proceso de diseño y el de optimización. Así, mientras el diseño busca una solución a un problema sometido a unas especificaciones, la optimización busca la mejor de las soluciones que cumpla con esas especificaciones. En este trabajo los procesos de diseño abordados están orientados siempre a la obtención de soluciones óptimas y, por lo tanto, estos términos se usan indistintamente.

El diseño óptimo es uno de los principales campos de trabajo para la ingeniería

actual. En este ámbito puede considerarse que es en el área de la aero / hidrodinámica donde este proceso se convierte en fundamental y, de hecho, inherente a los procesos de diseño que suele abordar. Los sistemas de optimización fluidodinámica son de aplicación principalmente en el sector aeronáutico y aeroespacial, aunque también aparecen en sectores como el naval, el automovilístico y el energético.

La demanda continua de la mejora de los productos, tanto en los requerimientos como en los tiempos y coste del diseño, han llevado a que los procesos de diseño no puedan depender únicamente, o en gran parte, de la experiencia y/o criterio del diseñador. Así, desde la primera mitad del siglo XX, especialmente durante la Segunda Guerra Mundial y posterior Guerra fría, se han desarrollado procedimientos y metodologías de optimización aerodinámica en los cuales se independiza el proceso de búsqueda de soluciones, incluido el cumplimiento de objetivos y restricciones, del criterio del diseñador. Estas acciones no buscan excluir al diseñador del diseño sino establecer procesos objetivos que guíen la búsqueda de la mejor solución.

Las distintas metodologías desarrolladas para la optimización pueden agruparse en dos categorías atendiendo a la estrategia utilizada: deterministas y estocásticas. Los métodos deterministas fueron los que iniciaron el planteamiento metodológico del proceso de optimización aerodinámica. En un primer lugar se desarrollaron las técnicas basadas en la resolución del problema inverso [2], pasando posteriormente a métodos basados, principalmente, en técnicas de descenso de gradiente. Estos últimos, acompañando al desarrollo del cálculo computacional, partieron de técnicas basadas en análisis de la sensibilidad y del cálculo explícito del gradiente de las funciones de calidad del problema de optimización aerodinámico planteado. Sin embargo, los altos requerimientos computacionales de este tipo de aproximación y el desarrollo de la teoría de control planteada por Lions [3], propiciaron la aparición de uno de los métodos de mayor auge en los últimos años, el método de las ecuaciones adjuntas [4]. Este método de optimización fluidodinámica basa su funcionamiento en la generación de un sistema de ecuaciones adjunto que permite el cálculo del gradiente con un coste computacional similar al de resolución del problema fluidodinámico y que resulta ser función de la forma del diseño.

Los métodos deterministas basados en técnicas de descenso de gradiente y, especialmente, el método de las ecuaciones adjuntas han generado durante las últimas dos

décadas muy buenos resultados en el campo de la optimización aerodinámica, llevando a su popularización para un gran número de diseñadores, principalmente dentro del ámbito aeronáutico. Sin embargo, su aplicación presenta algunos inconvenientes. En primer lugar estos métodos no resultan apropiados cuando existen discontinuidades, tanto en las variables de diseño como en la función objetivo, o cuando estas variables son discretas. Además, al ser métodos de optimización basados en gradientes, tienen problemas para localizar el óptimo global en funciones muy complejas con varios subóptimos locales. En este último tipo de problemas, debido al procedimiento seguido, los métodos basados en gradientes tienden a estancarse en el óptimo local más próximo a la alternativa de partida. Además de estos problemas comunes a todos los métodos basados en el descenso de gradiente, existen inconvenientes que son propios del método de adjuntos. Su principal problema reside en el manejo de las restricciones, ya que no se mueven en el dominio de la forma del objeto (valores límites de fuerzas o dimensiones) sino en el del espacio adjunto. Esto implica que las restricciones han de traducirse o imponerse como un sistema de ecuaciones adicional a resolver, con la consiguiente necesidad de desarrollar el sistema de ecuaciones adjunto asociado a la restricción, incrementando el coste computacional de la resolución del problema.

Debido a estas dificultades, los métodos estocásticos y, especialmente, los algoritmos evolutivos han empezado a tener una mayor consideración durante los últimos años. La principal diferencia de estos métodos respecto a los deterministas es que el proceso de búsqueda es global y multipunto sin partir de una única solución inicial. Como consecuencia de esta estrategia, el proceso de búsqueda requiere de la evaluación de un número elevado de individuos, resultando, en ocasiones, computacionalmente costoso. Sin embargo este inconveniente ha ido perdiendo importancia debido al incremento exponencial de las capacidades computacionales y a la aparición y desarrollo de distintas técnicas y metodologías que mejoran la eficiencia de la exploración del espacio de soluciones.

Es en el marco de la aplicación de estas técnicas al diseño óptimo fluidodinámico donde se encuadra esta tesis. En ella se explora la automatización del proceso de diseño en problemas de optimización en este ámbito mediante la utilización de métodos basados en evolución. Para ello se estudiarán los problemas derivados de esta aproximación y se propondrán distintas soluciones para aplicarlos. De esta forma, la apli-

cación práctica de la metodología propuesta es uno de los grandes ejes de trabajo en esta tesis. Los problemas a los que se aplican se pueden englobar en tres categorías: planteados a través de proyectos de investigación por empresas o entidades públicas (diseño óptimo de aerogeneradores, timones y velas), apertura de nuevas líneas futuras de trabajo (optimización de las formas de carenas y optimización multiobjetivo de perfiles hidrodinámicos) y pruebas de técnicas propuestas (diseño de contracciones).

Como resultado del estudio realizado se desarrolla una metodología que permite la automatización del proceso de diseño óptimo. Esta automatización y su integración con las herramientas de análisis utilizadas es fundamental para centrar la función del diseñador en el establecimiento de los requisitos, las especificaciones y las restricciones del problema, es decir, en aquellas tareas en las que se requiere la introducción de conocimiento en el problema, y liberarlo de las tareas en las que no se requiere aporte de información. Sin embargo, las características propias de cada una de las distintas áreas involucradas hace necesario que se desarrollen procedimientos específicos que permitan la interacción entre cada una de ellas. Con este objetivo la estructura de diseño propuesta se ha descompuesto en dos módulos fundamentales, un módulo de búsqueda que recoja los algoritmos de optimización y un módulo de evaluación que incluya el conjunto de procesos que permitan la simulación de las alternativas.

El desarrollo del primer módulo se basa en el análisis del comportamiento de distintos algoritmos evolutivos para su aplicación a problemas de diseño óptimo fluido-dinámico. Para abordar este análisis se estudia su comportamiento en un problema concreto, el diseño de aerogeneradores que han de operar en un entorno con un régimen variable de viento. Sin embargo, dado que una de las dificultades que se plantea es cuán cerca del óptimo llega nuestro algoritmo, se incluye un problema de diseño adicional para el que existe un óptimo analítico que podemos utilizar de referencia para la validación, como es el caso del de un aerogenerador para un perfil y velocidad dado. El objetivo es para evaluar la capacidad del algoritmo propuesto, en este caso un macroevolutivo, para alcanzar el óptimo del problema. De este modo, a partir de los resultados del estudio y de las pruebas realizadas, tanto con distribuciones de viento como en el problema con un óptimo conocido, se establece un procedimiento de búsqueda aplicable a los problemas objeto de esta tesis. Este estudio se extiende al análisis de los problemas multiobjetivo, ya que sus características específicas hacen

que su comportamiento sea totalmente distinto a los algoritmos de búsqueda mono-objetivo. Para evaluar el problema se aplica un algoritmo multiobjetivo, más concretamente el NSGAI, como motor de búsqueda para el problema de diseño óptimo de perfiles hidrodinámicos. Entre los parámetros estudiados se ha evaluado no sólo la capacidad para localizar el conjunto de soluciones óptimas si no la posibilidad de integrar restricciones y procesos de evaluación basados en simulación.

El segundo bloque de trabajo se enfoca al estudio del proceso de evaluación de las alternativas. Una de las primeras dificultades que se encuentran es que los métodos de transformación directa del genotipo (parámetros del modelo) al fenotipo (representación real del modelo) no es aplicable en estos problemas, por este motivo es necesario establecer un proceso específico para realizar esta transformación. Así, se desarrollan distintas estrategias para pasar de una definición paramétrica a una malla tridimensional. Las estrategias planteadas abarcan sistemas como la generación de mallas, desplazamiento de frontera o de inmersión de frontera. La especial dificultad de su automatización hacen de éste elemento uno de los puntos críticos a estudiar para el adecuado funcionamiento de un sistema de diseño automático en el ámbito de la fluidodinámica. Simultáneamente al problema de generación de la malla se estudia el proceso de simulación. En el planteamiento de la tesis, más en concreto, en la metodología a seguir para alcanzar los objetivos esbozados anteriormente, se ha tenido muy presente que la principal amenaza de la estrategia adoptada es que ésta puede derivar fácilmente en un coste computacional excesivo que haga inviable la resolución del problema. Por ello se ha considerado prioritario la minimización de estos costes en todos los componentes que participan del desarrollo. En este sentido se estudian los distintos aspectos que inciden en el proceso de diseño óptimo de estudios fluidodinámicos y, especialmente, en su simulación, estudiando las simplificaciones que pueden introducirse en los modelos así como el ajuste de sus parámetros. Sin embargo, estas simplificaciones pueden introducir errores en los resultados, para mitigar sus efectos, se propone la incorporación de correctores basados en redes neuronales artificiales, que añaden un coste computacional despreciable al proceso ajustadas a través de estudios experimentales. Este tipo de aproximaciones se aplican a problemas reales para su validación, diseño óptimo de una contracción entre dos tubos de distintos diámetros para reducir las pérdidas e carga, diseño óptimos de timones para buques de tamaño medio que mejoren la capacidad de virada de la embarcación y diseño óptimo de las formas del casco del buque para

minimizar su resistencia al avance.

Adicionalmente, por ser un problema de especial interés dentro de las líneas de investigación y con diversos proyectos en el grupo investigación, se profundiza en el diseño óptimo de velas de competición. En él se utiliza el conjunto de técnicas desarrolladas en este trabajo permitiendo verificar el funcionamiento global del conjunto. Además, al disponer de un modelo de referencia optimizado mediante métodos tradicionales se pueden evaluar las mejoras conseguidas mediante la estrategia propuesta.

Por lo tanto, con el objetivo de conseguir un procedimiento suficientemente flexible y versátil se parte del establecimiento de un conjunto modular de procesos bien integrado. A continuación se estudian distintas metodologías para obtener una eficiente parametrización de la geometría de la superficie a optimizar. Finalmente se revisa la posibilidad de adaptación de los distintos procedimientos de simulación numérica en fluidodinámica a las características de explotación de las técnicas evolutivas y a los problemas particulares contemplados. También se consideran las particularidades del ámbito fluidodinámico para la mejor adaptación de los modelos computacionales utilizados en cada proceso de evaluación. De este último punto es necesario destacar que, al tratarse de un proceso de diseño óptimo basado en técnicas evolutivas, la precisión del simulador no es muy importante, sino su capacidad para ordenar adecuadamente los modelos evaluados en cuanto a la medida de calidad definida. Así, un simulador poco preciso es aceptable siempre que sea capaz de discriminar cuál de entre dos modelos produce mejores prestaciones, aun cuando el error con el que haya estimado la eficiencia de cada uno de ellos sea elevado. Como se verá, esto va a permitir la utilización de modelos numéricos que simplifiquen el problema y que requieren de un menor coste computacional. Evidentemente, cuando en un procedimiento se introducen simplificaciones de gran calado, se hace necesario validarlo y contrastarlo con resultados experimentales que permitan ajustar los resultados obtenidos, en los casos analizados se ha hecho a través de pruebas en túneles aerodinámicos y la discrepancia se ha corregido a través de la introducción de sistemas neuronales. Esto permitirá obtener resultados cuantitativamente mas realistas equivalentes a lo que supondría el empleo de CFDs más complejos sin el enorme coste computacional que ello implica.

La presente tesis se sitúa dentro del área de la mecánica de fluidos y en su aplicación a la optimización y diseño de formas en ingeniería, mas concretamente en la

ingeniería naval, tanto desde el punto de vista hidrodinámico como del aerodinámico. Necesariamente profundizará en temas y aplicaciones relacionadas con otras áreas, tales como la computación e inteligencia artificial, la ingeniería mecánica o aplicaciones relacionadas con sistemas aerodinámicos industriales. Es, de hecho, este planteamiento multidisciplinar el que genera el conocimiento e inspiración para propiciar la obtención de una solución para el problema global de la automatización del proceso de diseño. Es también esta amplitud de áreas y conocimientos la que hacen esta memoria quizás más difícil de estructurar. Por esta razón esta tesis se ha organizado de forma similar al procedimiento metodológico seguido para alcanzar los objetivos planteados.

En cuanto a la plasmación del trabajo, la memoria recoge el proceso iterativo que se ha seguido para el estudio de la automatización del proceso de diseño en la optimización de formas aerodinámicas y, como resultado, el desarrollo del entorno de diseño que recoja los resultados de este estudio. La construcción progresiva de este entorno se ha realizado con un enfoque práctico mediante la resolución de problemas reales de ingeniería que han sido elegidos para este fin. En cada una de las etapas se ha partido del entorno de la etapa anterior y, mediante el análisis de las pruebas realizadas, determinando deficiencias y puntos fuertes, y de los requerimientos de las nuevas pruebas, se han incorporado nuevas funcionalidades o procedimientos. Las características y requerimientos de cada problema fluidodinámico han hecho que este proceso iterativo no pueda considerarse totalmente lineal sino como un proceso acumulativo, así se ha generado un entorno flexible que, dentro de una estructura única, incorpora diversos procedimientos de tal forma que pueda adaptarse a las necesidades de cada problema.

Para su descripción, el trabajo realizado se ha estructurado en cinco bloques:

- **Presentación del problema.** En el primer capítulo se enmarca el problema y se introduce la metodología de resolución de problemas propuesta. Así se presentan las bases del trabajo desarrollado, abordando el estado del arte de la optimización fluidodinámica y estableciendo la estructura del entorno de diseño propuesto. Con el objeto de agrupar en un único punto y dar una visión coherente de los aspectos básicos de la fluidodinámica el capítulo 2 proporciona una visión resumida de los aspectos básicos del problema fluidodinámico, las ecuaciones que lo gobiernan y la dificultad de su resolución.

- **Estrategias de búsqueda.** En este bloque se analiza la aplicación a fluidodinámica de las estrategias de búsqueda que son objeto de estudio en esta tesis. En un primer lugar mediante un algoritmo genético canónico, que será utilizado como modelo de referencia. Posteriormente, analizados los resultados del estudio de las necesidades de mejora, se propondrá modificaciones al modelo inicial que permitan una mejor adaptación a la resolución de problemas de diseño de optimización fluidodinámica. De este modo, el problema de diseño óptimo de aerogeneradores se ha utilizado como punto de partida para el desarrollo del entorno evolutivo de diseño. Éste se utilizará para validar distintas alternativas para los algoritmos de búsqueda. Además, al existir algún caso particular con una solución analítica del óptimo será posible verificar la capacidad de la estructura propuesta en alcanzar el óptimo sin estancarse en subóptimos u óptimos locales.

- **Simulación numérica.** Una vez definida la estrategia de búsqueda es necesario integrar el proceso de simulación numérica en la automatización del proceso de diseño. Esto requiere analizar este proceso para determinar las mejores alternativas y la automatización de las mismas. En este primer caso el simulador utilizado es un modelo simplificado del problema real, proporcionando resultados tridimensionales a través de la integración de los resultados de un simulador bidimensional. El siguiente paso seguido en el desarrollo de esta estructura de diseño es la introducción de un simulador basado en el método de los volúmenes finitos. La especial importancia del mallado en este bloque requiere que se dedique una parte importante del mismo a su análisis. En los distintos problemas abordados, diseño de timones, contracciones, carenas y velas se han abordado las diferentes dificultades que presentan el uso de estos simuladores, desde la generación de la malla a los modelos numéricos utilizados. De especial consideración ha sido el problema del diseño óptimo de velas ya que, al disponer de resultados experimentales de un modelo de referencia, se han podido comparar los resultados obtenidos. La especial dificultad del proceso de simulación del comportamiento aerodinámico de las velas ha hecho necesario complementar los ensayos numéricos con ensayos en túnel de viento. Las pruebas y resultados de las mismas se recogen en el capítulo 6.

- **La resolución de problemas multiobjetivo.** Cuando se abordan problemas de optimización en problemas reales de ingeniería no es posible, muchos casos, definir una única función de calidad. Esto es, guiar la optimización a través de un sólo procedimiento. Es por ello por lo que se ha visto la necesidad de estudiar la forma de introducir múltiples objetivos en el proceso de optimización. Además, en un último ejemplo se ha analizado el comportamiento del sistema en problemas multiobjetivo para la optimización de perfiles hidrodinámicos. El estudio de la aplicación de este tipo de técnicas se detalla en el capítulo 7.
- **Conclusiones.** Los últimos capítulos exponen la estructura final del entorno de diseño propuesto, las conclusiones de los resultados obtenidos y las futuras líneas de trabajo.

Es necesario indicar también, que el trabajo de esta tesis se realiza en el marco de la actividad de investigación del Grupo Integrado de Ingeniería de la Universidade da Coruña y que los ejemplos y aplicaciones seleccionadas están todas relacionadas con proyectos reales de diseño y optimización de estructuras llevados a cabo en relación con industrias del entorno, entre ellos cabe citar Texas Controls, Beaufort, Cedervall, Aimen y Porto de Celeiro. Así mismo las actividades ligadas a la optimización aerodinámica de velas han sido elaboradas dentro de proyectos de investigación financiados por la Consellería de Innovación e Industria de la Xunta de Galicia, el Ministerio de Ciencia e Innovación y el Consejo Superior de Deportes. Para el desarrollo de esta tesis se ha combinado la actividad investigadora del autor en la Universidade da Coruña con estancias en el Departamento de Matemática Aplicada de la Universidade de Santiago de Compostela, en el Área de Fluidodinámica del Center for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia y en la Yacht Research Unit de la Universidad de Auckland.

Resumiendo, el trabajo recogido en esta memoria presenta los resultados del estudio y su aplicación a problemas reales de un entorno automático de diseño para optimización fluidodinámica. Este estudio y el entorno resultante no se plantea sólo como un estudio teórico de análisis sino que se proponen una serie de herramientas buscando la resolución de problemas reales de ingeniería. La consecución de este objetivo exige un equilibrio entre el campo de simulación numérica y el de computación evolutiva, de tal

forma que compaginando ambas áreas y solventando las dificultades en su interacción puedan lograrse una resolución eficiente de los problemas planteados.

Objetivo y Metodología

Como se ha comentado en la introducción, el objetivo de esta tesis es el estudio de la automatización en el proceso de diseño para problemas de optimización fluidodinámica. Derivado de este análisis se obtendrá un entorno de diseño que incorpore estos resultados para su aplicación a problemas reales de ingeniería. La consecución de este objetivo supone la consecución de una serie de objetivos parciales:

- En primer lugar será necesario establecer la estructura y metodología que ha de seguir el proceso de diseño para abordar los problemas de optimización fluidodinámica considerados.
- Analizar las implicaciones de su automatización y el procedimiento para conseguirla. Para ello se establecerán las relaciones e interconexiones entre las dos operaciones principales del sistema: la búsqueda de la mejor solución y la evaluación de cada posible solución.
- Determinar el algoritmo o conjunto de estrategias de búsqueda de soluciones que permitan solventar problemas tan heterogéneos como los abordados, ya que los problemas de optimización fluidodinámica pueden implicar desde la introducción de pequeñas modificaciones sobre una parte de un modelo previo hasta el diseño completo de un nuevo elemento.
- Establecer un proceso o procedimiento para la automatización del proceso de simulación. Esto requiere la automatización de las tres etapas de la simulación: la generación de la malla, la resolución del comportamiento del medio fluido y el análisis de los resultados. Esto nos llevará a evaluar las distintas alternativas para cada uno de las etapas anteriores, principalmente la generación de la

mallas y la resolución del comportamiento del medio fluido, para establecer los procedimientos que se adecuen mejor a cada problema concreto.

- Automatizar el proceso de diseño de tal forma que la participación del diseñador se centre únicamente en la definición del problema y no en la resolución del mismo. Este punto es esencial para la aplicación práctica del entorno de diseño ya que gran parte de los problemas de optimización fluidodinámica requieren de un elevado tiempo de cálculo y, por tanto, es necesario que el sistema opere sin necesidad de supervisión durante estos prolongados periodos.
- Establecer mecanismos de conexión entre los módulos que puedan conectar los distintos elementos del entorno de diseño a la vez que permitan la paralelización del proceso.
- Es también objetivo de esta tesis verificar el adecuado funcionamiento de una estructura de este tipo en problemas de distintas características en el ámbito de la fluidodinámica.

La metodología seguida en este trabajo se ha basado en una espiral de proyecto. De este modo, una vez definido el núcleo inicial de lo que constituye el proceso automático de diseño óptimo fluidodinámico, se establece un proceso iterativo de análisis y mejora de los distintos elementos que conforman el sistema. Con el objetivo de analizar los efectos de cada alternativa para cada módulo, se estudiará, en la medida de lo posible, de forma independiente su influencia sobre el proceso de optimización global. Además, mediante su aplicación a problemas de ingeniería se evaluarán las implicaciones de su implementación y en que situaciones es más adecuada.

De este modo se partirá de una configuración básica del entorno de diseño y se evaluarán las posibles mejoras sobre cada uno de los módulos que lo conforman. En primer lugar, se buscará definir la estrategia de búsqueda más adecuada. Con este objetivo será necesario estudiar el comportamiento de distintos algoritmos y realizar un elevado número de pruebas para determinar su eficiencia, por lo que será necesario establecer problemas cuyo proceso de evaluación no sea costoso.

En una segunda etapa será necesario analizar el proceso de evaluación de alternativas. Esto implica la necesidad de estudiar el proceso de la definición tridimensional de

cada alternativa, la generación de la malla y la simulación. Aunque estas etapas están fuertemente interrelacionadas, los efectos e implicaciones de cada posible estrategia han de estudiarse separadamente del resto de componentes, de tal forma que pueda establecerse cuándo es más adecuado el uso de cada uno de los distintos métodos posibles.

Como se ha indicado en los objetivo, este trabajo nace orientado a la resolución de problemas de optimización fluidodinámica aplicados a problemas reales de ingeniería. Esto ha llevado a que cada etapa del proceso de desarrollo de este entorno se haya orientado a resolver un problema de mayor complejidad que el anterior o que presente distintas problemáticas. Con la finalidad de facilitar la exposición y comprensión del trabajo realizado no se ha presentado siguiendo la secuencia temporal en la espiral de diseño sino que se han agrupado atendiendo al bloque o módulo del entorno de diseño donde se ha centrado el análisis.

Atendiendo a la estrategia planteada, en cada problema o capítulo se ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Analizar los nuevos requerimientos del problema.
2. Incorporar los resultados de las experiencias previas.
3. Introducir los cambios en el sistema motivados por los dos puntos anteriores.
4. Realizar las pruebas con la nueva implementación del entorno de diseño.
5. Analizar los resultados obtenidos para definir las mejoras conseguidas y las deficiencias detectadas.

De esta forma se estudian los dos grandes bloques que constituyen el entorno de diseño:

- Las estrategias de búsqueda.
- El proceso de simulación utilizado para la evaluación de las alternativas.

En el estudio de las estrategias de búsqueda se plantea la necesidad de una estrategia que evite problemas típicos como el estancamiento en mínimos locales, el tratamiento de funciones no continuas, la introducción de restricciones u operar con múltiples objetivos.

La diversidad de modelos y requerimientos del proceso de simulación han tenido como consecuencia que el trabajo aquí planteado no haya sido el desarrollo de un simulador particular, sino el desarrollar un procedimiento que permita integrar y automatizar el cálculo dentro del entorno de diseño pero sin que esto limite el modelo numérico seleccionado. Esto lleva a que se analicen por separado las distintas etapas del proceso de simulación: la definición de la forma y su mallado, la resolución del modelo numérico y el postprocesado de la información. En los distintos problemas abordados se aplicarán distintas estrategias para cada uno de estos elementos, de tal forma que se consigan un conjunto flexibles de herramientas y procedimientos, no ligadas a software utilizado, y que permitan integrarse en el entorno de diseño.

Capítulo 1

Diseño automático y optimización fluidodinámica

El análisis de la automatización del proceso de diseño en problemas de optimización fluidodinámica y su implementación en un entorno de diseño exige compaginar dos campos muy distintos y que, en general, han seguido líneas de investigación diferenciadas el diseño automático y la optimización fluidodinámica. Como punto de partida para definir la estructura de un proceso de diseño óptimo nos vamos a basar en la metodología utilizada en el proceso de diseño en ingeniería. Así en un primer lugar se analizan los requerimientos y características de este proceso de diseño, de tal forma que sirva de introducción a la segunda parte donde se analiza la automatización del mismo.

Como se ha indicado, la aplicación en fluidodinámica tiene características y requerimientos específicos que es necesario analizar y considerar para poder aplicar la metodología de resolución de problemas de diseño propuesta. Así, en la tercera parte de este capítulo se enmarca este problema, reflejando la evolución y las alternativas para este proceso y estableciendo las alternativas para su introducción en un entorno automático de diseño.

Finalmente, en la cuarta sección de este capítulo se combinan las aportaciones de las tres aproximaciones para definir el esqueleto formal de un entorno de diseño cuyo

contenido se irá completando a lo largo de la memoria.

1.1. El Proceso de diseño

El diseño en ingeniería es un proceso sistemático que busca obtener soluciones a una determinada necesidad [5]. Así según la ABET (Accreditation Board for Engineering and Technology) [6]:

”El diseño en ingeniería es el proceso de idear un sistema, componente o proceso para satisfacer las necesidades deseadas. Este es un proceso de toma de decisiones (a menudo iterativo), en el cual las ciencias básicas, las matemáticas y las ciencias de la ingeniería son aplicadas de manera óptima para convertir recursos para satisfacer un objetivo establecido. Entre los elementos fundamentales del proceso de diseño están el establecimiento de objetivos y criterios, síntesis y análisis, construcción y evaluación...”

Aunque el origen del diseño en ingeniería puede remontarse al origen de la ingeniería misma, no es hasta la segunda mitad del siglo XX cuando surgen las primeras metodologías para su realización de una forma sistemática [7]. Así no es hasta 1963 cuando J.C. Jones [8] formula la primera metodología para el diseño en ingeniería. Este procedimiento y reglas, es el que constituye el método clásico de diseño. La base fundamental de este método es el abordar los problemas mediante su descomposición en problemas mas simples para ir aumentando paulatinamente su complejidad según se avanza en la definición del nuevo diseño.

Dentro de esta metodología pueden distinguirse dos corrientes principales, por un lado una corriente denominada *científica* basada en la introducción del método científico en el proceso de diseño [9][10]. El objetivo de este planteamiento puede resumirse en una racionalización del proceso de diseño dejando en un segundo plano los métodos creativos subjetivos y emocionales que tradicionalmente han estado ligados al diseño artístico. Frente a esta corriente se ha desarrollado otra alternativa denominada *creativa*, basada en una potenciación del proceso inductivo [11]. Mediante esta estrategia el pro-

blema se aborda no como la propuesta de una única solución sino como la búsqueda de diversas soluciones obtenidas mediante diferentes aproximaciones, incentivando la creatividad del diseñador.

Si bien cada una de estas metodologías proponen una aproximación distinta para abordar el proceso de diseño, sí que es posible definir unas etapas comunes.

1.1.1. Etapas del proceso de diseño

Los diseños de ingeniería pueden agruparse en dos tipos: equipos, sistemas o procesos que no existían anteriormente o aquellos que surgen como mejora de otros existentes previamente. En todo caso un nuevo diseño no surge espontáneamente, sino como resultado de reunir conocimientos y tecnologías que aplicados metodológicamente consiguen resolver un problema [12]. También es necesario tener en cuenta que el diseño en ingeniería se diferencia de otros procesos de resolución de problemas, como son los de análisis, en que, en general, no resulta en una única solución, sino en un conjunto de soluciones válidas que cumplen con unas especificaciones.

Es tradicional contemplar el diseño en cinco etapas principales [13] que se estructuran en forma de un proceso iterativo y que, en muchas ocasiones, requiere de la vuelta atrás en otras etapas del proceso. Generalmente ante la aparición de nuevas dificultades no contempladas en fases previas y que requieren retroceder nuevamente a las etapas de análisis y realizar nuevos modelos. En concreto estas etapas son:

1. Definir el problema.
2. Recopilar la información relativa al problema.
3. Generar diversas posibles soluciones.
4. Analizar y seleccionar una solución.
5. Probar y desarrollar la solución.

La primera etapa del proceso de diseño es la definición del problema. Esta definición se basa en la identificación de los requerimientos que ha de cumplir el producto



Figura 1.1: Esquema del proceso de diseño

así como otros condicionantes debidos a los procesos de fabricación disponibles, materiales admitidos, etc. De este modo se determinan los requerimientos y restricciones de producto, obteniendo una especificación funcional del mismos.

Una vez identificados los detalles del diseño se inicia un proceso de generación de alternativas para alcanzar los objetivos del diseño final. De este modo, atendiendo a los criterios de selección, las mejores alternativas son escogidas para un análisis en profundidad. A continuación, se construye un prototipo para verificar su funcionalidad y, en caso necesario, establecer modificaciones en el mismo con el objeto de conseguir mejores resultados.

En los siguientes apartados estudiaremos con mayor profundidad cada una de las etapas.

1.1.1.1. Definición del problema

El proceso de diseño se inicia mediante una clara definición del problema que se aborda, eliminando las posibles ambigüedades. De otro modo, se iniciaría sin unos claros objetivos, lo que puede llevar a resultados no satisfactorios y alargar el proceso

más de lo esperado.

La primera etapa, de la que dependerá el resultado final, es la determinación del objetivo u objetivos que se pretenden alcanzar. En este sentido hay que considerar la necesidad de establecer medidas cuantificables de los mismos, ya que, aunque estos puedan ser subjetivos, como ocurre por ejemplo en el caso de criterios estéticos, han de establecerse medidas que puedan cuantificarlos. Además es necesario, en el caso de problemas multiobjetivo, establecer las prioridades respecto a las distintos objetivos ya que hay que considerar que llegar a la mejor alternativa en todos ellos no es, en general, factible y han de buscarse soluciones de compromiso. Un ejemplo claro de esta situación es el diseño de un elemento estructural en el que se busca, soportando unos esfuerzos definidos, minimizar el peso y el coste de la pieza desde el punto de vista estructural o mecánico. Con estos criterios el material a seleccionar sería el de mayor relación entre su límite elástico y densidad, pero esto suele ir contrapuesto con el precio del mismo.

Los objetivos suelen estar directamente asociados al problema tratado y, por tanto, la tarea del diseñado suele estar restringida a la cuantificación de los mismos. Esta etapa debe llevar a un completo conocimiento del problema, para lo cual esta fase se estructura en los siguientes pasos:

1. *Identificación de las necesidades.* Los problemas de diseño en ingeniería se corresponden con unas necesidades humanas o industriales. Por ello, antes de iniciar el proceso de diseño es necesario determinar las necesidades o requerimientos para el nuevo producto o sistema [14]. Esta definición no tiene por qué ser realizada por el diseñador sino que suele venir dada por el cliente, sin embargo, el diseñador ha de involucrarse en este proceso para conseguir una correcta comprensión del problema. En este punto es muy importante destacar que este proceso no debe reducirse a en la identificación de los defectos de los productos existente sino que ha de realizarse un análisis del problema en sí.
2. *Formulación del problema.* Tras la identificación de las necesidades del producto es necesario formular el problema. Esto supone un paso respecto al punto anterior ya que hay que definir los requerimientos, desde el punto de vista de ingeniería, para satisfacer las necesidades identificadas en el punto anterior. Para

alcanzar una correcta definición será necesario establecer el proceso de resolución del proceso de diseño: los datos necesarios, los experimentos y simulaciones a realizar, etc. El proceso de generación de un nuevo producto está sujeto a una serie de requerimientos, especificaciones, normativas, etc. que hacen que no se puedan considerar todas las alternativas posibles. Por ello, previamente a la definición de las distintas alternativas es necesario identificar las restricciones a las que está sometido el diseño. Estas restricciones pueden dividirse en dos grupos, aquellas que pueden aplicarse a priori antes de la generación de las alternativas, tales como límites de tamaño y peso, y otras que exigen un análisis del producto, como pueden ser ensayos de resistencia de materiales, ensayos de fatiga, etc. Esta división viene dada por el momento de aplicación de las mismas, ya que las primeras se aplican durante la generación de las alternativas y las segundas cuando ya se está realizando el análisis de la misma.

3. *Definición de los criterios a satisfacer.* Es esta etapa se especifican, cuantitativamente, los atributos o propiedades de debe cumplir el diseño para considerarse una alternativa válida. Además se incluyen los criterios que se seguirán para clasificar las alternativas. Estos criterios no tienen porque ser totalmente rígidos durante el proceso de diseño, sino que se pueden adecuar al avance en el proceso, de tal forma que en las primeras etapas se pueda aumentar su flexibilidad para no limitar drásticamente las soluciones.

Los criterios a aplicar en cada problema particular vienen determinados por la experiencia del diseñador, ya que no sólo hay que definir los criterios sino que hay que asignar los recursos destinados a cumplir con cada uno de los criterios, de tal modo que se establecen prioridades en el proceso de diseño.

1.1.1.2. Recopilación de información

La siguiente fase del proceso de diseño es la recopilación de la información disponible relativa al problema de diseño abordado. Mediante esta recopilación de información se pueden identificar los elementos críticos de este proceso, que pueden llevar, incluso, a una necesidad de redefinición de los criterios aplicables al problema [15]. Mediante este estudio, se pretende responder, entre otras, las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el estado del arte actual del problema?
- ¿Es necesaria una nueva solución o el problema está total o parcialmente resuelto?
- ¿Cuáles son las soluciones existentes del problema?
- ¿Cuáles son los problemas de los diseños anteriormente desarrollados?
- ¿Cuáles son los factores económicos que rigen la solución?
- ¿Qué otros factores son importantes en la solución del problema?

1.1.1.3. Generación de soluciones

Definido el problema se inicia la fase de generación de nuevas ideas para resolver el proceso de diseño [16]. En esta fase se definen distintos posibles modelos solución. Para la generación de alternativas se pueden establecer dos métodos o estrategias diferenciadas. La primera se basa en generar nuevos modelos independientes y en la segunda los nuevos modelos se obtienen mediante modificación de un modelo o modelos previos. Estas dos estrategias pueden utilizarse por separado o en modelos híbridos donde se emplean ambas aproximaciones dependiendo del tipo de problema y la fase de diseño en el que se encuentre.

La segunda estrategia es adecuada, principalmente, cuando se tiene un modelo inicial próximo a la solución deseada. Sin embargo, cuando la solución no está claramente definida, es necesario aumentar el tamaño del dominio de la búsqueda y la diversidad de las alternativas.

1.1.1.4. Análisis y selección de una solución

Una vez generado un conjunto de alternativas para la solución del problema, se requiere analizarlas para decidir cuál es la más adecuada. Este análisis consiste en la evaluación de los diseños propuestos, a ser posible resuelto a través de un procedimiento sistemático.

Esta fase puede estructurarse en el siguiente ciclo de trabajo:

1. *Análisis de las posibles soluciones.* Antes de decidir cual será la solución final es necesario analizar el cumplimiento de los criterios de evaluación la la solución candidata. Las peculiaridades de cada proceso de diseño particular no permiten definir un proceso único de análisis sino que habrá que adecuarlo al problema concreto. A partir de los objetivos del problema, es necesario determinar como se evalúa su cumplimiento en las distintas alternativas. Este es uno de los puntos críticos del proceso de diseño y es donde el diseñador tiene un puesto fundamental. Es en este punto donde se aplican las definiciones de las medidas de la consecución de los objetivos planteados. La elección del procedimiento se basa, principalmente, en dos aspectos, la precisión de los resultados obtenidos y el coste del mismo, dentro de el coste hay que considerar las horas de personal y cómputo, licencias de software, modelos y prototipos Así, es el diseñador el que debe determinar el procedimiento que, proporcionando los resultados adecuados, requiera menos recursos. Estos análisis pueden ser, entre otros:
 - Análisis funcional.
 - Análisis estructural, aerodinámico, electromagnético..
 - Análisis de su manufacturabilidad.
 - Análisis de coste.
 - Análisis de cumplimiento respecto a una normativa.
2. *Etapas de decisión.* Finalizado el proceso de análisis es necesario seleccionar la mejor opción, o un grupo de las mejores a partir del cual generar nuevas alternativas y reiniciar esta etapa. En esta fase han de compararse los valores que cada una de las alternativas ha obtenido en los diferentes análisis realizados. Para ello han de ponderarse estos valores con la finalidad de alcanzar una medida final que permita una clasificación de las alternativas.

1.1.1.5. Ensayo de la solución

La fase final del proceso de diseño es la implementación y prueba de la solución propuesta para el problema de diseño planteado. Es en esta etapa donde se construyen

los prototipos para el inicio del análisis final de la alternativa, estos últimos análisis son mas detallados que los previos ya que han de llevar a la definición final de la solución antes de pasar a su producción o implantación.

1.2. El diseño automático

La necesidad de desarrollar una metodología para el proceso de diseño en ingeniería no está únicamente motivada por una necesidad de mejorar el proceso en si, sino que se vio forzada por la necesidad de incorporar las nuevas herramientas informáticas al proceso de diseño, normalmente en forma de simulador. La importancia que han cobrado en la industria ha llevado a integrar estas herramientas en los métodos de diseño, propiciando un grado de automatización del proceso. Consiguiendo a través de la definición paramétrica del problema una significativa mejora de la productividad [17].

En general, las herramientas de simulación se desarrollan como un medio para realizar funciones específicas dentro del proceso de diseño[18], por ejemplo, la síntesis, la verificación y la optimización. Es por ello que la automatización de este procesos requiere del desarrollo de un entorno que englobe a todas las herramientas utilizadas sin que estas funciones hayan de estar explícitamente conocidas por el marco de diseño.

En la sección anterior se han expuesto las etapas que han de realizarse en el proceso de diseño y, por ello, han de introducirse dentro del entorno de diseño. Es en la automatización de este proceso donde es fundamental diferenciar en que acciones es necesario que el equipo de ingenieros introduzca conocimiento en el proceso y en cuales simplemente se realizan tareas sistemáticas en las que no se introduce ningún aporte adicional de información [19].

Este planteamiento de reducir la participación del diseñador a las tareas en las que se requiere una aportación de conocimiento, normalmente ligado a la definición del problema, es el objetivo que se persigue mediante la automatización del proceso de diseño. Esto resulta de especial importancia cuando se está tratando con sistemas complejos donde los distintos subsistemas están acoplados con interacciones no lineales entre las partes, llevando a que sea necesario considerar el sistema de forma global.

Es en estos casos donde el diseñador humano, para poder manejar la complejidad, ha de restringir mucho el espacio de soluciones en el que se mueve y realizar muchas aproximaciones que le permitan descomponer el problema y, por lo tanto, es en este tipo de situaciones donde mayor beneficio se podría derivar de la automatización que se propone.

1.3. Optimización fluidodinámica

El trabajo de ingeniería supone un proceso continuo de mejora de los diseños existentes, este esfuerzo se realiza con el objetivo de incrementar la eficiencia del producto y reducir sus costes de producción. Si bien hay ciertos aspectos del diseño, como los estéticos, que son difícilmente mensurables, aquellos que intervienen en el rendimiento o en el coste son, normalmente, susceptibles de un análisis cuantitativo. Si este diseño se realiza sin seguir una estrategia de optimización definida [20], las importantes decisiones que se requiere tomar durante el proceso de diseño y que van a afectar drásticamente al rendimiento final serán dejadas únicamente al criterio formado por la experiencia del personal, ingenieros e investigadores, involucrado en el desarrollo. Puesto que son estas decisiones las que harán que el proyecto en cuestión cumpla sus objetivos o fracase, la utilización de adecuados métodos de optimización son cruciales para conseguir mejoras el producto y, por tanto, mejorar la competitividad de la empresa.

En el marco de la fluidodinámica, las aplicaciones del diseño óptimo de forma (Optimal shape design – OSD) son muy numerosas, especialmente cuando se abordan problemas regidos por ecuaciones en derivadas parciales. Esto incluye problemas que van desde el cálculo estructural hasta el electromagnetismo, pasando por la mecánica de fluidos, y, atendiendo a las nuevas demandas de la industria, una combinación de las tres [21].

Es el campo de la aviación donde existe una mayor necesidad de estos sistemas debido al importante ahorro que supone pequeñas mejoras en los diseños, ejemplos son los trabajos de Jameson [22], Reuter [23] y Alonso [24]. Dentro de las aplicaciones en mecánica de fluidos también pueden indicarse trabajos tan variados como: la reducción

de peso y emisión de ruido en el diseño de motores, automóviles, aviones, e incluso instrumentos musicales [25]; o la reducción del campo de olas en el diseño del buque [26].

Los primeros procedimientos de optimización aerodinámica se comienzan a desarrollar en las primeras décadas siglo XX, estas técnicas se han basado en el desarrollo de soluciones analíticas de los problemas para alcanzar las formas óptimas. La primera aplicación en este campo [27], en donde se aplica el análisis de la sensibilidad de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales respecto de la forma del dominio, se remonta a los trabajos de Hadamard en 1910 [28]. Otro ejemplo, ya con un objetivo de aplicación práctica, es el trabajo de Lighthill [2] que en 1945 inicia aplicación del mapeado conforme de aplicación a problemas aerodinámicos, concretamente, al diseño de perfiles bidimensionales para obtener una distribución de presiones objetivo.

El estudio del proceso de optimización aerodinámica sometida a restricciones fue iniciado por Hicks [29] mediante la introducción de las diferencias finitas para la evaluación la sensibilidad del sistema respecto a cada uno de los diferentes parámetros que definen el problema aerodinámico. Desde entonces, los métodos de optimización aerodinámica se han fundamentado mayoritariamente en métodos basados en técnicas de descenso de gradiente. La principal desventaja de este tipo de métodos es su elevado coste computacional. Este coste computacional es debido a la necesidad de calcular el jacobiano del problema, para ello se requiere la resolución del flujo tantas veces como parámetros tenga el problema.

Un cambio significativo en las técnicas de optimización lo propició la aplicación de la teoría de control a sistemas de ecuaciones en derivadas parciales propuesto por Lions [3] a partir del cual, ya en 1973, J. Cea [30] establece las bases para los procesos de optimización de forma tal y como se consideran actualmente. Esto hace que estos procesos hereden la nomenclatura propia de los sistemas de control; se busca minimizar una función de coste, la cual depende de unas variables de estado, tales como la resolución de un sistemas de ecuaciones en derivadas parciales, que es en si misma una función de un control, las condiciones de contorno dadas por la forma del objeto. Este problema fue abordado, entre otros, por Pironneau [31].

El desarrollo de estos nuevos métodos han modificado los procedimientos tradicio-

nales de optimización, descartando la estructura lineal y monodisciplinar en el desarrollo de un nuevo diseño. Es por ello que las nuevas estrategias de diseño abordan el problema integrando todas las disciplinas participantes. Es aquí donde surge el método de los adjuntos. En él, para cada uno de los distintos análisis es necesario el desarrollo del sistema lineal de ecuaciones en derivadas parciales que constituye el sistema adjunto. La principal ventaja que presenta este método es que permite evaluar su jacobiano con un coste computacional similar a la resolución del sistema de ecuaciones original. Sin embargo exige que los procesos habituales utilizados para la simulación y análisis en ingeniería resulten insuficientes y se requiera de un simulador adicional para la resolución del sistema adjunto [32].

Las aplicaciones aeronáuticas reales de estos sistemas se inician en la década de los 90, [33] y [34], en ellas se muestra la posibilidad de realizar el diseño de un avión para un criterio como la resistencia al avance y bajo restricciones como el volumen o sustentación. Sin embargo el problema de optimización resulta de una elevada dificultad numérica debido a los requerimientos de procesamiento intensivo y a la necesidad de alcanzar un compromiso entre la mejor forma, desde el punto de vista aerodinámico, y otros criterios y restricciones.

Los métodos basados en las técnicas de descenso de gradiente, como son los anteriores, se encuentran con dificultades para localizar el óptimo cuando éste no está claramente definido, por ejemplo cuando existen diversos mínimos y máximos locales con pequeñas diferencias de calidad entre ellos. Dentro de estos problemas destacan los de diseño aerodinámico, especialmente en las etapas iniciales del mismo, donde se dispone de un número elevado de alternativas muy distintas y debido a la alta no linealidad del sistema de ecuaciones que rigen el comportamiento del fluido no puede definirse claramente una alternativa inicial sobre la que realizar un proceso de optimización.

Una de las técnicas estocásticas de optimización global más prometedores en los últimos años son los algoritmos evolutivos, implementados en lo que se ha dado en llamar computación evolutiva. El uso de la Computación Evolutiva para la optimización de diseños comenzó sus andanzas hace unos 30 años con los trabajos de Schaffer [35]. Durante los últimos veinte años se han optimizado con éxito una gran variedad de diseños de ingeniería [36], desde volantes de inercia [37] hasta la geometría de un avión [38]. En estos trabajos, más que realizar un proceso de diseño automático, se op-

timizan diseños ya existentes. En particular comienzan generalmente el proceso con un diseño existente, y parametrizan en un cromosoma aquellas partes del diseño susceptibles de ser mejoradas. Estos parámetros se codifican como genes que evolucionan por medio de un algoritmo evolutivo de búsqueda. Los diseños son evaluados a menudo interconectando el sistema a un determinado software de análisis, que se utiliza para evaluar la calidad de cada diseño. Las representaciones del fenotipo para estos problemas de optimización de diseño son específicas, y consisten en diseños existentes cuyos parámetros se hacen evolucionar. A menudo la transformación del genotipo-fenotipo es rudimentaria o no existe, simplemente porque no es necesaria para tal evolución. Debido a esto, las representaciones del genotipo pueden estar muy próximas a las representaciones del fenotipo, a menudo con una relación uno a uno entre los genes y los parámetros.

La ventaja que presentan los algoritmos evolutivos para la resolución de este tipo de problemas es que, al no estar basados en técnicas de gradiente, se adaptan perfectamente a la resolución de problemas de optimización que presentan diversos máximos y mínimos locales. Además permiten abordar su alto número de parámetros y la no linealidad de los sistemas que rigen los modelos utilizados [39]. A diferencia de los procesos de análisis con el sistema adjunto, el uso de algoritmos evolutivos no requiere introducir un sistema de ecuaciones adicional. Esto hace que la evaluación de las alternativas así como la introducción de restricciones se realice utilizando idénticas herramientas que las utilizadas en los procesos de análisis.

Durante la última década se han desarrollado distintos ejemplos de aplicación de los algoritmos evolutivos a problemas de ingeniería, sin embargo estos se han centrado en su aplicación en problemas muy concretos o ensayos con fines didácticos. Esta tesis aborda la integración del análisis fluidomecánico en un entorno evolutivo de optimización de aplicación a problemas reales de ingeniería. Con este procedimiento no se ha buscado resolver un problema concreto sino definir una estrategia de resolución para los problemas fluidodinámicos que integre todos los elementos del proceso de diseño óptimo. Las características específicas de los distintos problemas fluidodinámicos que pueden abordarse hacen que no se plantee este proceso como un sistema cerrado sino como una estructura abierta y dinámica que pueda adaptarse en cada caso para obtener los mejores resultados.

1.3.1. Simulación fluidodinámica

El problema de diseño óptimo en fluidodinámica requiere de un proceso de evaluación de la calidad de las alternativas, esto es, analizar su comportamiento ante los requerimientos fijados. Difícilmente se disponen de recursos suficientes para evaluar en la situación real de operación cada una de las posibilidades. Es en este punto donde el desarrollo de la simulación numérica desde el último cuarto del siglo XX ha revolucionado completamente los procesos de ensayo en el campo de la mecánica de fluidos, como referencia el trabajo de A. Jameson [40] sobre la influencia de la simulación numérica en el diseño aerodinámico de los aviones. La simulación numérica ha permitido aumentar el número de modelos a analizar, reduciendo el coste y los plazos requeridos para los análisis.

La capacidad de cálculo y almacenamiento computacional disponible ha crecido enormemente durante las dos últimas décadas, como ejemplo puede verse la evolución de capacidad de procesamiento del *Centro de Supercomputación de Galicia* que entre los años 1997 y 2007 ha multiplicado por 8.400 su capacidad de cálculo, véase figura 1.2. Además este incremento de potencia a llevado asociado un progresivo abaratamiento del coste de la potencia de cálculo. Estos dos aspectos, la alta capacidad de cálculo y el bajo coste de la misma, han hecho posible que se desarrollen sistemas con muy altos requerimientos computacionales para resolver problemas cada vez más complejos.

La posibilidad de disponer de potentes recursos computacionales ha llevado a que las técnicas de simulación y optimización hayan sufrido un muy fuerte impulso durante la última década, además su bajo coste ha posibilitado que se hayan desarrollado un elevado número de simuladores, herramientas que van desde la resolución de problemas de mecánica de fluidos hasta problemas de distribución de flujos de productos y procesos en el interior de plantas industriales. Permitiendo, además, que su uso se haya generalizado en gran parte de los sectores industriales, especialmente en aquellos que se tienen que posicionar en la vanguardia tecnológica para competir en el mercado internacional.

En los siguientes capítulos se profundizará en este proceso de simulación numérica, características y requerimientos, sin embargo es necesario señalar las principales partes que lo componen de tal forma que pueda entenderse como ha de estructurarse

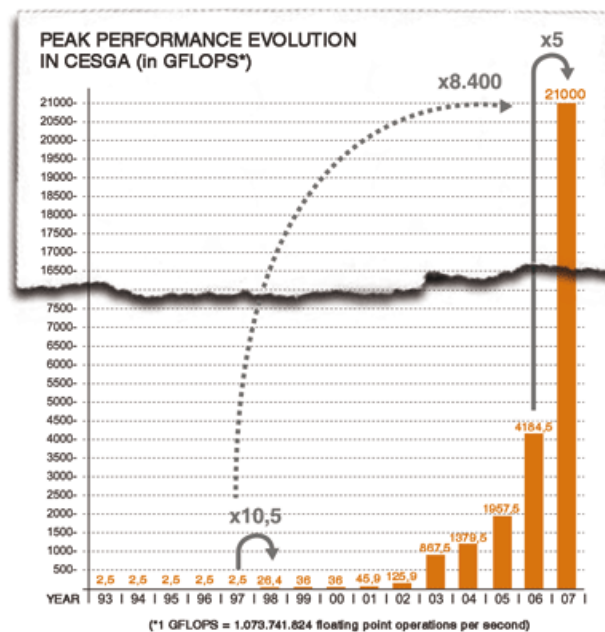


Figura 1.2: Evolución de la capacidad de cálculo del Centro de Supercomputación de Galicia

un entorno de diseño para poder integrarlo.

El funcionamiento de los simuladores fluidodinámicos se basa en resolver las ecuaciones que rigen el comportamiento del medio fluido, ecuaciones de Navier-Stokes, en el que está inmerso el modelo. Este estudio puede estructurarse en tres fases que pueden establecerse como generales a todos los procesos de simulación.

- **Preprocesado.** Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido son formuladas para medios continuos. Sin embargo los procesos de cálculo computacional no pueden establecerse sobre medios continuos si no que requieren de una discretización la región que contiene al fluido. De esta forma las ecuaciones se resuelven sobre cada uno de los elementos o celdas en los que se ha dividido el dominio.
- **Resolución.** El proceso de resolución de las ecuaciones se basa en su discretización de tal forma que se recoja la influencia de cada elemento sobre sus vecinos. De este modo es posible conocer el comportamiento global del fluido y su inter-

acción con el modelo a estudio.

- *Postprocesado*. La resolución de las ecuaciones proporciona valores de las magnitudes físicas características del fluido en cada uno de los elementos del dominio. Sin embargo, normalmente, la información que se requiere de estos análisis no es el valor puntual de estas magnitudes, sino su integral sobre una superficie, por ejemplo, la fuerza resultante, o un valor medio, o la desviación de una magnitud. Es por ello que, una vez resuelto el sistema de ecuaciones es necesario procesar los datos resultantes con la finalidad de obtener dichos valores.

Estas etapas son comunes a los procesos de simulación, sin embargo el coste computacional y precisión de los resultados dependerá de los procedimientos utilizados para desarrollarlos. Mediante el procedimiento de discretización se determina el número de celdas y la relación entre ellas, y, por tanto, el tamaño del sistema de ecuaciones. Además el modelo de comportamiento del fluido, con las ecuaciones que lleva asociado, y el procedimiento de resolución para las mismas, condicionará el número de operaciones requeridas para su resolución.

1.4. Entorno automático de diseño para la optimización fluidodinámica

El entorno de diseño empleado en este trabajo ha sido creado con el objetivo de alcanzar resultados válidos en procesos de diseño genérico. Lo cual implica que esta implementación contiene un conjunto de bloques independientes que pueden ser sustituidos y reestructurados dependiendo del proceso concreto de diseño con el que se trate y de la clase de simulaciones y evaluaciones requeridas. En él el proceso de diseño no se ha planteado como un proceso lineal sino como un proceso iterativo en el que cada etapa implica un acercamiento al modelo final.

El entorno que da soporte al diseño ha de proporcionar una plataforma básica para el resto de elementos y es el encargado de gestionar el flujo de información y de los procesos. Esto implica que debe proporcionar una estructura flexible y adaptable a las diferentes necesidades del proceso concreto de diseño que se quiere abordar [41].

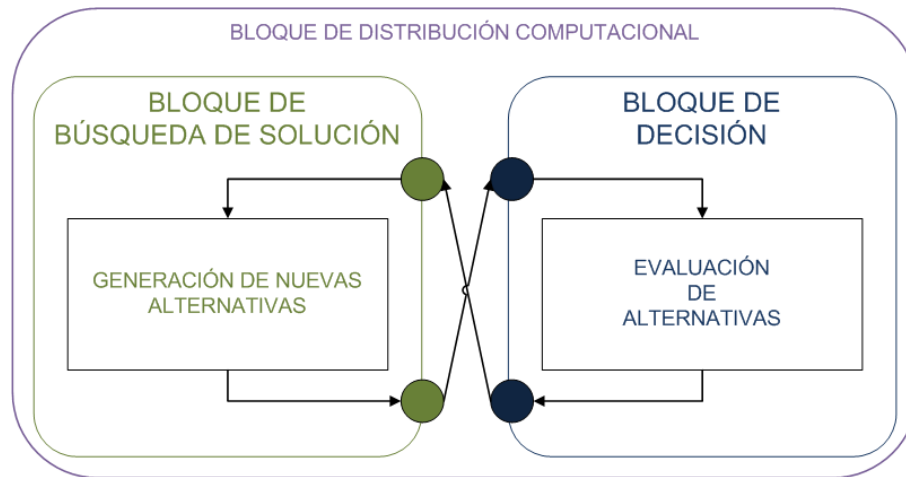


Figura 1.3: Esquema del entorno de diseño

A partir de una estructura general del proceso de diseño, el entorno se puede dividir en los siguientes bloques:

- **Bloque de búsqueda de solución**, que integra los algoritmos de búsqueda de solución. En el entorno desarrollado estos son algoritmos evolutivos. El módulo de búsqueda ha de establecer la estrategia de localización de óptimos adecuada al problema objetivo, de forma que en él se evalúen los resultados de cada iteración y se determinen las alternativas que serán evaluadas en la siguiente etapa del proceso.
- **Bloque de evaluación**. En este bloque se calcula la calidad de los distintos individuos o alternativas. De esta forma puede establecerse un criterio que permita seleccionar las más adecuadas.
- **Bloque de distribución computacional**. El elevado coste computacional de estas estrategias exige que se realice el cálculo de forma distribuida, es decir, repartir la carga total de trabajo entre distintos nodos de procesamiento. Esto exige la coordinación de la información requerida en cada nodo y la transmisión de información entre los mismos, así como la gestión de los diferentes módulos que intervienen en este proceso. Este elemento no se constituye en sí mismo como un elemento propio del entorno, sin embargo es una estructura sobre la que se apoyan el resto de bloques y que determina su desarrollo e implementación. El

bloque de distribución computacional es el que controla el proceso de diseño a más bajo nivel y, por tanto, es el que tiene que ser más flexible para dar soporte a los distintos algoritmos de búsqueda y evaluación.

Mediante la unión de estos cuatro bloques se ha desarrollado una herramienta de optimización diseñada con una estructura versátil, orientada a la optimización de problemas fluidodinámicos. Una de las dificultades que condicionan la implementación del simulador fluidodinámico es el elevado número de evaluaciones que han de realizarse. Esto implica que, por un lado ha de tener un relativo bajo coste computacional y, por otro, debe poder paralelizarse en un número elevado de nodos de procesado. Es por ello que la elección de cada uno de los distintos elementos ha de realizarse buscando minimizar su coste computacional.

Capítulo 2

El problema fluidodinámico

Uno de los pilares en los que se sustenta este trabajo es el proceso de simulación numérica de fenómenos de fluidodinámica como base para la evaluación de la calidad de cada una de las distintas alternativas del problema considerado. Así, aunque el desarrollo de un simulador propio no es un objetivo de esta tesis, es necesario profundizar en su funcionamiento y en los modelos utilizados con la finalidad de poder integrarlos en el entorno de diseño y poder automatizar el proceso.

La integración de simuladores fluidodinámico en los procesos de optimización requiere, en primer lugar, del análisis del comportamiento de los medios fluidos. Este comportamiento está regido completamente por las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, la resolución completa de las mismas requiere de un elevadísimo coste computacional que hace que su resolución, actualmente, no sea viable en problemas de interés práctico, especialmente en aquellos en los que aparecen fenómenos turbulentos. Por ello es necesario introducir modelos numéricos adicionales que simplifiquen el proceso de cálculo. La calidad de los resultados obtenidos y el coste computacional del proceso depende directamente del modelo numérico utilizado y las suposiciones consideradas. Es por ello que para cada problema será necesario analizar diferentes modelos, determinando cual es el más adecuado para cada caso concreto.

Para poder definir un simulador es necesario definir el conjunto de ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido. La selección de un modelo numérico adecuado exige analizar el problema específico y los requerimientos del mismo. A partir de

este análisis, se puede establecer un conjunto de modelos alternativos al comportamiento del fluido y las consideraciones introducidas en cada uno de ellos así como los errores que se generan. Al ser este un trabajo interdisciplinar en el que se combinan dos áreas de conocimiento habitualmente no interconectadas: computación evolutiva y mecánica de fluidos, se ha considerado necesario introducir una breve recopilación de los aspectos fundamentales de la mecánica de fluidos utilizados. El objeto de esta reseña es evidenciar la complejidad de la resolución de estas ecuaciones y la necesidad, dentro de las características y exigencias del problema, de utilizar el modelo mas sencillo posible. En los siguientes puntos se describen los principales modelos utilizados y las consideraciones que en ellos se introducen, de tal forma que sirvan de punto de partida a los desarrollos realizados en los siguientes capítulos.

2.1. Ecuaciones de Navier - Stokes

El comportamiento termodinámico de un fluido está completamente definido mediante el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes, este sistema de ecuaciones será el que sirva de base para el resto de modelos utilizados.

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho \mathbf{u} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \rho \mathbf{u} + p\mathbf{I} - \boldsymbol{\tau}) = \rho \mathbf{f}_e \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho E + \nabla \cdot (\rho H \mathbf{u} - \kappa \nabla T) = W_f + q_H \quad (2.3)$$

en donde, ρ representa la densidad, \mathbf{u} la velocidad, p la presión, \mathbf{I} el tensor identidad, $\boldsymbol{\tau}$ el tensor de esfuerzos viscosos, \mathbf{f}_e las fuerzas exteriores específicas, E la energía total específica, κ el coeficiente de conducción térmica, H la entalpía, W_f el trabajo de las fuerzas externas, T la temperatura y q_H el calor aportado (véase [42]).

La ecuación (2.1) traduce el principio de conservación de la masa, (2.2) es la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento y (2.3) representa el principio de conservación de la energía. Este sistema de ecuaciones se completan con leyes de

comportamiento, con las ecuaciones de estado termodinámico y con condiciones de contorno e iniciales adecuadas para tener un problema bien planteado. La resolución de las ecuaciones (2.1) -(2.3) no es viable en muchos casos y en los que es viable suele ser extremadamente compleja; por ello es de interés obtener información cualitativa analizando las contribuciones dominantes. Para determinar la importancia relativa de los distintos términos que intervienen se utilizan unos parámetros adimensionales que caracterizan el flujo.

En nuestro caso los más significativos son

- Número de Reynolds, que representa la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas

$$Re = \frac{\|\mathbf{u}\|L}{\nu}. \quad (2.4)$$

- Número de Froude, que muestra la relación entre las fuerzas inerciales y gravitatorias (g denota la aceleración de la gravedad),

$$Fr = \frac{\|\mathbf{u}\|}{\sqrt{Lg}}. \quad (2.5)$$

- Número de Prandtl, mide la influencia relativa en la difusión de la energía entre la de origen viscoso y la de conducción térmica.

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa}. \quad (2.6)$$

- Número de Euler, mide la relación entre la presión, y la energía cinética.

$$Eu = \frac{P}{\rho\|\mathbf{u}\|^2}. \quad (2.7)$$

- Número de Mach, que mide la compresibilidad del medio (a , velocidad del sonido en el medio). Este parámetro tiene significado únicamente cuando se estudian fluidos en régimen compresible y, en estos casos, se utiliza sustituyendo al número de Euler.

$$M = \frac{\|\mathbf{u}\|}{a}. \quad (2.8)$$

2.2. Leyes de comportamiento

Las ecuaciones de Navier-Stokes, (2.1)- (2.3), deben ser completadas con la ley de comportamiento que relaciona el tensor de esfuerzos con del resto de variables cinemáticas del fluido y las leyes de estado termodinámicas. Trabajaremos con fluidos newtonianos que se caracterizan porque el tensor de esfuerzos es de la forma:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^t) + \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} \quad (2.9)$$

donde μ y λ son los coeficientes de viscosidad del fluido (véase [42]), dependientes de la temperatura. Además las leyes termodinámicas de estado permiten definir la energía interna, E , la densidad, ρ y la entalpía, H , que aparecen en ecuación (2.3), como funciones de otras dos variables termodinámicas, en este caso la presión y la temperatura:

$$E = E(p, T), \quad \rho = \rho(p, T), \quad H = H(p, T) \quad (2.10)$$

Debido a la complejidad del sistema se empleará un modelo simplificado de fluido a temperatura y densidad constantes, que permite prescindir de la ecuación de la energía (2.3). De esta forma el sistema se reduce a las ecuaciones (2.1) y (2.2) con la ley de comportamiento (2.9).

2.3. Modelo de fluido incompresible

Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden ser simplificadas, en el caso de fluidos que se mueven en régimen incompresible, al permitir desacoplar las ecuaciones de conservación de la masa (2.1) y de la cantidad de movimiento (2.2). En efecto en esta situación la ecuación de conservación de la masa (2.1) se reduce a

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2.11)$$

Introduciendo (2.11) en la ley constitutiva del tensor de esfuerzos (2.9) resulta

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = \mu \Delta \mathbf{u} \quad (2.12)$$

de tal forma que la ecuación del movimiento (2.2) puede reescribirse como

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{f}_e \quad (2.13)$$

donde $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ es la viscosidad cinemática del fluido.

2.3.1. Flujos no viscosos: Ecuaciones de Euler

En una gran parte de los problemas de ingeniería que se han considerado se encuentran dentro de un rango de valores altos del número de Reynolds, situaciones la componente viscosa tiene un orden de magnitud despreciable frente al aporte del resto de términos, por lo que puede considerarse el fluido como no viscoso en gran parte del dominio, salvo en la capa límite que se produce en las proximidades de superficies de los objetos analizados, así como en el seno de la estela turbulenta. Debido a la importancia de estos problemas, se detallarán las ecuaciones que rigen su comportamiento.

La formulación usual para fluidos no viscosos se realiza mediante las ecuaciones de Euler. Estas pueden ser obtenidas a partir de las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento, ecuación (2.13), despreciando todos los términos de esfuerzos cortantes, representados por el tensor τ :

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{f}_e \quad (2.14)$$

Estas simplificaciones permiten obtener aproximaciones válidas para flujos a alto número de Reynolds fuera de las regiones viscosas y turbulentas.

Con este modelo se introduce un cambio significativo en la formulación matemática que pasa de un problema mixto en el que pueden aparecer regiones de tipo parabólico, hiperbólico o elíptico a otro de tipo hiperbólico o elíptico, y, además, sólo retiene los términos con derivadas de primer orden.

2.3.2. Ecuaciones de Navier Stokes promediadas. Energía cinética turbulenta y tasa de disipación

Para el análisis de un flujo turbulento una variable ϕ se descompone en suma de un valor promedio $\bar{\phi}$, independiente del tiempo cuando el flujo es estacionario, y una perturbación de media nula ϕ' , de tal modo que $\phi = \bar{\phi} + \phi'$. Consideraremos las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles en el caso estacionario y sin fuerzas

exteriores, es decir,

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} \quad (2.16)$$

Introduciendo la descomposición en valor medio y fluctuación para la velocidad y la presión, y utilizando que la media de las fluctuaciones es cero, se obtiene

$$\partial_1 \bar{u}_1 + \partial_2 \bar{u}_2 + \partial_3 \bar{u}_3 = 0, \quad (2.17)$$

$$\sum_{j=1}^3 \bar{u}_j \partial_j \bar{u}_i = -\frac{1}{\rho} \partial_i \bar{p} + \sum_{j=1}^3 \left(-\partial_j \overline{u'_i u'_j} + \nu \partial_{jj} \bar{u}_i \right), \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.18)$$

De las ecuaciones de continuidad (2.11) y (2.17) se desprende que el campo de fluctuación de la velocidad es también de divergencia nula. Los únicos términos de perturbaciones que permanecen en las ecuaciones (2.18) generan un tensor simétrico, $\overline{u'_i u'_j} = \overline{u'_j u'_i} = \sigma_{ij}$, que representa la interacción entre las fluctuaciones, llamado tensor de esfuerzos de Reynolds. Reescribiendo (2.18) es función del tensor de esfuerzos viscosos de la velocidad promedio

$$T_{ij} = \partial_j \bar{u}_i + \partial_i \bar{u}_j \quad (2.19)$$

se obtiene la ecuación de Navier-Stokes promediadas según reynolds

$$\sum_{j=1}^3 \bar{u}_j \partial_j \bar{u}_i = \sum_{j=1}^3 \partial_j (\nu T_{ij} - \overline{u'_j u'_i}) + \partial_i \left(\frac{1}{\rho} \bar{p} \right), \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.20)$$

Notemos que resultan unas ecuaciones análogas a las de Navier-Stokes para las velocidades promedio, pero aparecen seis nuevas incógnitas correspondientes al tensor de Reynolds, σ_{ij} .

En los siguientes cálculos para simplificar la notación introducimos

$$\mathcal{N}(u_i) = \rho \sum_{k=1}^3 (u_k \partial_k u_i - \mu \partial_{kk} u_i) + \partial_i \bar{p}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2.21)$$

Desarrollando y reordenando los términos se llega a

$$\sum_{k=1}^3 \overline{u_k} \partial_k \sigma_{ij} = \sum_{k=1}^3 -\sigma_{ik} \partial_k \overline{u_j} - \sigma_{jk} \partial_k \overline{u_i} - \partial_k (\nu \partial_k \sigma_{ij} - C_{ijk}) - \eta_{ij} + \pi_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.22)$$

en donde

$$\pi_{ij} = \frac{p'}{\rho} (\partial_j u'_i + \partial_i u'_j) \quad (2.23)$$

$$\eta_{ij} = 2\nu \sum_{k=1}^3 \overline{\partial_k u'_i \partial_k u'_j} \quad (2.24)$$

$$\rho C_{ijk} = \overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_i} \delta_{jk} + \overline{p' u'_j} \delta_{ik} \quad (2.25)$$

El procedimiento de promediado reduce en gran medida la información contenida en las ecuaciones de Navier-Stokes; además, en la práctica, se procede sustituyendo los tensores π , η , y C por constantes obtenidas empíricamente.

Puesto que en la mayoría de los problemas abordados no es posible utilizar mallas lo suficientemente finas para calcular los torbellinos de las escalas mas pequeñas, es necesario recurrir a técnicas que modelen ese tensor: el modelo $k - \epsilon$, Spalart, $k - \omega$, etc.

Definiremos la energía cinética turbulenta, k , como

$$k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \overline{u'_i u'_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\sigma_{ii}}{2} \quad (2.26)$$

siendo σ el tensor de esfuerzos de Reynolds. Sumando los términos correspondientes a la diagonal del tensor en (2.22), se obtiene la ecuación del transporte de k ,

$$\sum_{j=1}^3 \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = - \sum_{j=1}^3 \left(\sum_{i=1}^3 (\sigma_{ij} \partial_j \overline{u_i} - \eta_{ij}) + \partial_j \left(\nu \partial_j k - \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j u'_k} - \frac{1}{\rho} \overline{p' u'_j} \right) \right) \quad (2.27)$$

Otra magnitud significativa en estos modelos es la disipación turbulenta

$$\epsilon = \nu \overline{\nabla u' : \nabla u'} \quad (2.28)$$

donde : es el producto escalar de tensores. El campo ε representa la cantidad de energía absorbida por las fuerzas viscosas por unidad de tiempo y de masa. Depende de las características físicas del fluido, más precisamente, de ν . Para obtener la ecuación en derivadas parciales que verifica la disipación turbulenta se utiliza la relación

$$2\nu\overline{\partial_j u'_i \partial_j \mathcal{N}(u_i)} = 0 \quad (2.29)$$

obteniéndose la siguiente ecuación

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^3 \overline{U_j} \partial_j \varepsilon = & -2\nu \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left(\sum_{k=1}^3 \left(\overline{\partial_k u'_i \partial_k u'_j \partial_i u'_k \partial_j u'_k} \right) \right) \partial_j \overline{U_i} - \\ & 2\nu \overline{u'_k \partial_j u'_i \partial_{kj} \overline{U_i}} - 2\nu \overline{\partial_k u'_i \partial_m u'_i \partial_m u'_k} - 2\nu^2 \overline{\partial_{km} u'_i \partial_{km} u'_i} + \\ & \partial_j \left(\nu \partial_j \varepsilon - \nu \overline{u'_j \partial_m u'_i \partial_m u'_i} - 2 \frac{\nu}{\rho} \overline{\partial_m p' \partial_m u'_j} \right) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Dentro del flujo turbulento aparece un amplio espectro de escalas de torbellinos (véase [43]); desde las escalas mayores, que tienen el orden de magnitud de la longitud característica del flujo, a las menores, donde se producen los fenómenos disipativos. Los torbellinos de las escalas de mayor tamaño extraen energía cinética del flujo principal, energía que se va transmitiendo a escalas inferiores hasta alcanzar las más pequeñas, llamadas de Kolmogorov, donde las fuerzas viscosas transforman la energía cinética en interna. En las escalas más pequeñas se producen los mayores gradientes de velocidad, asociados a bajos números de Reynolds; los gradientes de velocidades son mayores cuanto menor es la escala del torbellino, lo que implica que la disipación, ε , alcanza ahí el mayor valor.

Así se genera una cascada de energía en el que la energía cinética turbulenta nace en las grandes escalas de la turbulencia, es desplazada a través de las intermedias para finalmente disiparse en las escalas más pequeñas. De este modo, atendiendo en



Figura 2.1: Escalas de turbulencia

la región en la que nos encontremos, la medida de este fenómeno, ϵ representará esta disipación turbulenta o la tasa de transferencia de la energía cinética turbulenta por unidad de masa y tiempo entre las distintas escalas.

Las dimensiones características, expresadas en función de la energía disipada y la viscosidad cinemática de estas pequeñas escalas son

$$\begin{aligned} \text{longitud} &= \left[\frac{v^3}{\epsilon} \right]^{\frac{1}{4}}, \\ \text{tiempo} &= \left[\frac{v}{\epsilon} \right]^{\frac{1}{2}}, \\ \text{velocidad} &= [v \cdot \epsilon]^{\frac{1}{4}}. \end{aligned} \tag{2.31}$$

2.3.2.1. Modelo $k - \epsilon$

Existen diversas alternativas para modelar esta disipación turbulenta, modelos de una o dos ecuaciones normalmente ajustados mediante variables de carácter empírico. Con el objetivo de ilustrar la complejidad de la resolución de estos modelos se ha optado por exponer uno de los modelos más habitualmente utilizados en problemas de simulación aerodinámica de la turbulencia es el $k - \epsilon$, que consiste en agregar a la

viscosidad cinemática ν una turbulenta ν_T [44] definida como

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.32)$$

siendo k y ε los campos introducidos en (2.26) y en (2.28), de forma que el tensor de Reynolds se aproxima por

$$\widehat{\sigma}_{ij} = \nu_T (\partial_i \bar{u}_j + \partial_j \bar{u}_i) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}. \quad (2.33)$$

Las ecuaciones de k , (2.27), y de ε , (2.30), son muy difíciles de resolver al incluir nuevos términos como dobles y triples productos entre las fluctuaciones y sus derivadas. Por ello se sustituyen estos términos por constantes empíricas.

2.4. Selección del modelo

En los puntos anteriores se han resumido los principales modelos utilizados en este trabajo. Sin embargo, esto no supone que sean los únicos posibles ni que el entorno de diseño se restrinja a estos, sino que lo único que se pretende es manifestar la complejidad de estos sistemas de ecuaciones y la necesidad reducir la complejidad modelos.

Las características particulares de cada problema hace que no pueda establecerse un modelo simplificado único para las ecuaciones que lo rigen, sino que sólo mediante el estudio de las características del problema y de los requerimientos que se exigen puede determinarse la alternativa mas adecuada. Así, conociendo las implicaciones computacionales de utilizar un modelo mas complejo y las mejoras que pueden conseguirse con él, el diseñador ha de escoger el modelo que más se adecue a sus necesidades.

Es por ello que el entorno de diseño desarrollado no puede restringirse a un único modelo si no que ha de posibilitar la utilización de aquel que, para cada problema, el diseñador estime mas adecuado.

Capítulo 3

Estrategia de búsqueda

En la sección 1.4 se estructuró el proceso de diseño en dos grandes bloques: la búsqueda de soluciones y la evaluación de las alternativas. En este capítulo se comenzará la automatización de este proceso, para ello se analizará la estrategia de búsqueda para resolver los problemas de diseño óptimo fluidodinámico, analizando distintos algoritmos y las implicaciones de su uso en problemas reales de ingeniería.

Por este motivo el capítulo se inicia, tras introducir los elementos básicos de los algoritmos evolutivos, con el estudio de un algoritmo genético canónico. En este análisis se abordarán los parámetros y estructura de este algoritmo y su aplicación al diseño de aerogeneradores. En la segunda parte del capítulo, a partir de los resultados obtenidos, se propondrá un algoritmo que solvete las deficiencias detectadas y mejore los resultados obtenidos, como ejemplo práctico se volverá a aplicar al diseño óptimo de aerogeneradores aunque en un caso con una complejidad mayor. Así, como conclusión del capítulo, se obtendrá la estructura que se utilizará para el módulo de búsqueda en las siguientes pruebas.

3.1. Introducción

Los crecientes retos de la optimización fluidodinámica hacen que los espacios de búsqueda sean cada vez más complejos, al mismo tiempo la potencia de cálculo dispo-

nible se incrementa a gran velocidad. Todo esto lleva a que la utilización de algoritmos estocásticos, especialmente los algoritmos basados en evolución, sean cada vez una posibilidad mas adecuada para abordar estos problemas [21].

Los algoritmos evolutivos presentan una serie de ventajas frente a otros métodos deterministas, entre ellas pueden destacarse:

- Se pueden aplicar fácilmente a cualquier problema, basta idear una representación adecuada. Esto es debido a que estos algoritmos se han desarrollado desacoplados del proceso de evaluación de la calidad y, por tanto, son independientes de éste.
- Realizan la búsqueda de la solución desde múltiples puntos simultáneamente, con lo que son menos susceptibles de caer en óptimos locales que métodos que realizan esta búsqueda desde un único punto, como los basados en procedimientos de descenso de gradiente.
- La independencia entre la evaluación y el algoritmo de búsqueda hace que el proceso de diseño sea fácilmente paralelizable.

Norbert Wiener en 1948 [45] en su libro *“Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine”* planteó de forma teórica la posibilidad de utilizar evolución para obtener sistemas de control para robots. A partir de este planteamiento teórico inicial se han desarrollado diversos algoritmos que hacen uso de una analogía entre el proceso evolutivo en la naturaleza y la búsqueda de una solución en un espacio determinado.

Un proceso de búsqueda basado en evolución parte de una población inicial de individuos, donde cada individuo es una posible solución al problema (un punto en el espacio de soluciones) y viene caracterizado por uno o varios cromosomas. Esta población evoluciona con el tiempo: los individuos se combinan y sufren mutaciones en los genes de sus cromosomas. La clave de este método es que la posibilidad que tiene un individuo de pasar a la siguiente generación depende de lo cerca que se encuentre de representar la solución del problema mediada a través de un valor de calidad. La forma en la que los individuos se combinan, cómo tienen lugar las mutaciones, la frecuencia

de ambas formas de reproducción, qué individuos se producen y, sobre todo, cómo se seleccionen los que pasan a la siguiente generación dan lugar a los diversos tipos de algoritmos evolutivos.

En el caso que nos ocupa, los individuos representan los parámetros que determinan las características y forma del modelo, bien de una manera directa o a través de alguna transformación. Esto es, el genotipo (representación cromosómica) es una representación uno a uno con el fenotipo (individuo, objeto o solución a valorar) o requiere de algún tipo de conversión. Para determinar lo cerca que está un individuo de la solución óptima, se le asigna una calidad en función de los resultados del simulador fluidodinámico que utilizaremos. Esta calidad determina las posibilidades de reproducirse del individuo, los de mejor calidad se reproducen más, y así se van obteniendo nuevas poblaciones de individuos que se corresponden cada vez más con el diseño objetivo.

Bajo la denominación de algoritmos evolutivos se engloban todas las técnicas inspiradas en el proceso de la evolución natural. Los tipos principales son los algoritmos genéticos, las estrategias de evolución y la programación evolutiva. A continuación se describe los elementos fundamentales y el mecanismo de funcionamiento de los algoritmos que se utilizan en este trabajo.

3.2. Algoritmo genético canónico

El análisis de la estrategia de búsqueda se ha iniciado con el estudio de los algoritmos genéticos al ser estos una referencia para el resto de algoritmos evolutivos. De forma genérica se puede considerar que pueden usarse como modelo para estudiar las etapas y procedimientos comunes, así como la definición de la nomenclatura utilizada.

Los algoritmos genéticos se popularizan a partir de los trabajos de Holland [46] y quedan formalizados en su trabajo de 1975 [47]. En las últimas décadas se han desarrollado diferentes estrategias de búsqueda basadas en los algoritmos genéticos. Aunque cada uno de ellos utiliza procedimientos diferenciados, pueden definirse un conjunto de elementos comunes a todos ellos:

Sean:

I , el espacio de búsqueda

$F : I \rightarrow \Re$, la función de calidad

μ , el tamaño de la población de los padres

λ , el tamaño de la población de descendientes

$P(t) = \{a_1(t), \dots, a_\mu(t)\} \in I^\mu$, la población de la generación t

$r : I^\mu \rightarrow I^k$, operador de recombinación

Θ_r , parámetros de funcionamiento del operador r

$m : I^k \rightarrow I^\lambda$, operador de mutación

Θ_m , parámetros de funcionamiento del operador m

$s : I^\lambda \rightarrow I^\mu$, operador de selección

Θ_s , parámetros de funcionamiento del operador s

t , criterio de parada

Θ_t , parámetros de funcionamiento del criterio de parada

Estructura de un algoritmo genético canónico

1. $t \leftarrow 0$
2. $P(t) \leftarrow \text{inicializar}(\mu)$
3. $F(t) \leftarrow \text{evaluar}(P(t), \mu)$
4. mientras $(P(t), \Theta_t) \neq \text{cierto}$, hacer
 - a) $P'(t) \leftarrow \text{recombinar}(P(t), \Theta_r)$
 - b) $P''(t) \leftarrow \text{mutar}(P'(t), \Theta_m)$
 - c) $F(t) \leftarrow \text{evaluar}(P''(t), \lambda)$
 - d) $P(t+1) \leftarrow \text{seleccionar}(P''(t), F(t), \mu, \Theta_s)$
 - e) $t \leftarrow t + 1$

Las características propias de los algoritmos evolutivos hacen que tengan su propia nomenclatura, los principales aspectos de la misma pueden resumirse en:

- **Individuo**, solución potencial del problema.
- **Población**, es el conjunto de individuos que representan posibles soluciones al problema.
- **Cromosoma**, información relativa a las características de los individuos en la población.
- **Gen**, cada uno de los componentes de un cromosoma.
- **Proceso de selección**, procedimiento por el que se determina sobre qué individuos se aplican los operadores genéticos.
- **Operadores genéticos**, son métodos para manipular la información del cromosoma de los individuos de la población con el objeto de generar nuevos individuos. Las principales estrategias para realizar estas operaciones son:
 - *Cruce*, se realiza una combinación de los genes de dos individuos (padres) para formar los cromosomas de nuevos individuos (descendientes). En términos de aplicación al proceso de optimización este operador es el que permite la explotación del espacio de búsqueda.
 - *Mutación*, se modifica de forma aleatoria el valor de uno o varios genes del cromosoma del individuo, permitiendo acceder a nuevas regiones del espacio de búsqueda, mejorando la exploración del mismo.
- **Calidad de un individuo**, medida de la aptitud de un individuo para su supervivencia.
- **Función de calidad**, es la función que se utiliza para asignar a un individuo un valor de calidad. Esta función está relacionada con la función objetivo a optimizar, de tal forma que cuanto mejor se adecue el individuo al objetivo mayor sea su valor de calidad.
- **Reemplazo**, procedimiento por el cual se determina, en base al valor de calidad, qué individuos pasarán a conformar la población de partida para la siguiente generación.

- **Generación**, cada una de las iteraciones en las que se repite el algoritmo.

Cada alternativa está codificada mediante un cromosoma, el número de genes que constituyen el cromosoma y la codificación del mismo es tal que permita la definición completa de la alternativa para permitir su evaluación. En las primeras aproximaciones al problema, los cromosomas estaban codificados en binario, es decir, cada gen era un 0 o un 1. Posteriormente se han utilizado otras codificaciones como, por ejemplo, codificar cada gen como un número real.

Selección

En el proceso de evolución es necesario crear nuevos individuos a partir de los presentes en la población y, por lo tanto, hay que determinar qué individuos contribuyen a generar descendientes.

El método original de selección de los individuos a reproducirse es el proporcional, también conocido como selección por “ruleta”. En este procedimiento cada individuo tiene una probabilidad de ser seleccionado para reproducirse igual a su calidad dividida por la suma de las calidades de todos los individuos. Este método, en algunas ocasiones, tiene el problema de aplicar una presión selectiva reducida. Cuando los valores de la calidad son muy dispares, esto es, existe mucha diferencia entre los peores y mejores individuos, todos los mejores individuos tendrán una calidad parecida y, por tanto, una probabilidad de reproducirse muy similar pudiendo llevar a la explotación de regiones alejadas del óptimo. También puede aparecer el problema contrario. Si durante el proceso evolutivo aparece un individuo con mucha mayor calidad que el resto de los individuos, la población rápidamente convergerá hacia ese individuo, ya que su probabilidad de reproducirse es mucho mayor que la de los demás, haciendo que la población se vuelva toda igual o muy similar y tienda hacia lo que puede resultar un mínimo local, a este efecto se le denomina convergencia prematura.

Existen otros tipos de selección que pretenden arreglar este tipo de problema. Un ejemplo es la selección por posición [48] en la que los individuos son ordenados por su calidad y su probabilidad de selección es una función de su posición en esa lista ordenada. Otro tipo de selección es la selección por torneo [49], donde se escoge

aleatoriamente un grupo de individuos y dentro de este grupo se selecciona para reproducirse aquel que tiene mayor calidad. Este proceso se repite hasta que se tienen todos los individuos que se necesitan para reproducirse. Así incrementando el tamaño del grupo se incrementa la presión del proceso evolutivo. Otras alternativas utilizadas realizan consideraciones estadísticas en base a la distribución de la calidad o buscan preservar la diversidad de los individuos.

Cruce

El cruce es el operador principal en los algoritmos genéticos. En su forma más genérica consiste en escoger dos individuos con un cromosoma de longitud m , un punto de cruce, y crear dos individuos nuevos de tal forma que cada uno tenga los primeros n genes de un progenitor y los siguientes $m-n$ genes del otro. Con el operador de cruce se busca que, dados dos individuos con buena calidad pero por razones distintas, al cruzarse, el individuo resultante pueda combinar los genes que provocaban una buena calidad en ambos progenitores, dando lugar a un individuo todavía mejor. Este fenómeno fue planteado originalmente por Holland [47], aunque fue Schaffer [50] en 1987 quién lo formalizó de forma teórica. Evidentemente la mejora del individuo no se produce siempre, sino con una cierta probabilidad, pero cuanto mayor es la calidad de un individuo más veces se reproduce y, por tanto, mayor es la probabilidad de que la parte de su genoma causante de su buena calidad se mezcle con la parte correspondiente de otro individuo, dando lugar a individuos cada vez mejores, que tendrán una mayor probabilidad de reproducirse, guiando así el proceso evolutivo. Existen múltiples alternativas para realizar este cruce, entre otras el cruce multipunto [51] y el uniforme [52].

Mutación

La mutación consiste en modificar aleatoriamente uno o varios genes del cromosoma de un individuo. Si los genes son números reales, es frecuente que la mutación consista en sumar o restar al valor del gen una cantidad aleatoria con una distribución distinta a la uniforme (una normal, por ejemplo). La mutación en los algoritmos genéticos es un medio de introducir variedad en la población y, por eso, la probabili-

dad de mutación suele ser baja. Sin embargo, en el caso de la estrategia evolutiva, por ejemplo, la mutación es el operador fundamental y el que domina en la evolución.

Reemplazo

Finalmente, cuando no se quiera que la población crezca de forma infinita, como suele ser en el caso de problemas de optimización, es necesario definir qué individuos de la población generada de padres e hijos pasan a la siguiente generación y cuales desaparecen. Para seleccionar los individuos a ser reemplazados también se tienen varias alternativas. Podemos reemplazar los peores individuos o reemplazar aleatoriamente. En el primer caso aceleramos el proceso evolutivo y perdemos variedad. En el segundo podemos perder, quizás para siempre, buenos individuos y frenar la convergencia o incluso impedirla.

En definitiva, un algoritmo genético canónico implementa todos estos operadores, así las variaciones del mismo surgen como variación de estos operadores o del orden seguido. De hecho, cuando el proceso de evolución se basa en mutación y no implementa reemplazo se trata de estrategias evolutivas o cuando lo evolucionado es un programa se denomina programación genética [53] o evolutiva [54].

3.3. Diseño de aerogeneradores mediante algoritmos genéticos canónicos

A partir de la estructura básica del proceso de diseño evolutivo definido en 1.4 vamos a realizar una primera implementación utilizando como algoritmo de búsqueda un algoritmo genético canónico. Lo que se pretende con esta prueba es evaluar el comportamiento de este algoritmo en problemas de optimización fluidodinámica, de este modo se detectarán los puntos fuertes del algoritmo y los aspectos que tendrán que ser mejorados en las siguientes fases de desarrollo.

Para ello se aplicará la estructura propuesta al diseño de aerogeneradores de pequeño tamaño. Además, se buscará analizar la eficiencia del algoritmo de búsqueda

elegido, un algoritmo genético canónico. Se ha optado por este algoritmo por ser el más analizado en la bibliografía y posibilitar un modelo de referencia para el resto de algoritmos que se estudien. Con el objetivo de desacoplar las dificultades del proceso de evaluación del de búsqueda, en este caso se plantea una evaluación con un simulador de bajo coste computacional e implementado específicamente de tal forma que pueda integrarse sin dificultad en el entorno. De este modo nos podemos centrar en los algoritmos de búsqueda obviando las dificultades de los CFD's.

Así se ha aplicado la estructura inicial del entorno de optimización a un problema real propuesto por una empresa colaboradora al diseño de palas de aerogeneradores de pequeño tamaño. En este caso el simulador calcula las características aerodinámicas de cada pala. Esta evaluación se realiza mediante el uso de métodos de flujo potencial bidimensional combinado con métodos integrales de capas límite, corrigiendo los resultados mediante una red neuronal para introducir los efectos del desprendimiento del flujo sobre el perfil. En la segunda etapa de cálculo se evalúa la potencia generada por la pala mediante la integración de cada sección bidimensional mediante la teoría del elemento de pala. En este problema se combinan los algoritmos genéticos con un simulador de muy bajo coste computacional con el objetivo de determinar el correcto funcionamiento del sistema siguiendo el esquema que se muestra en la figura 3.1.

Los resultados que se alcancen están fuertemente condicionados por la función de calidad seleccionada. El objetivo de este experimento no es desarrollar el mejor aerogenerador para una velocidad de viento determinada, lo que es analíticamente calculable, sino el mejor operando en condiciones reales en los que cada velocidad de viento tiene una probabilidad. Es por ello que la función de calidad seleccionada es el promedio de la energía generada. De este modo el valor de calidad se obtendrá al integrar el valor de la energía por la probabilidad del viento considerado para el rango de vientos considerados.

En este problema concreto se busca el diseño de pala óptima para un generador de un diámetro máximo de 5 metros en un emplazamiento con una distribución de vientos modelada mediante una distribución Weibull con un parámetro de forma de valor 2 y una velocidad media de 7 m/s, que pueden considerarse como los valores medios de referencia para la costa norte gallega.

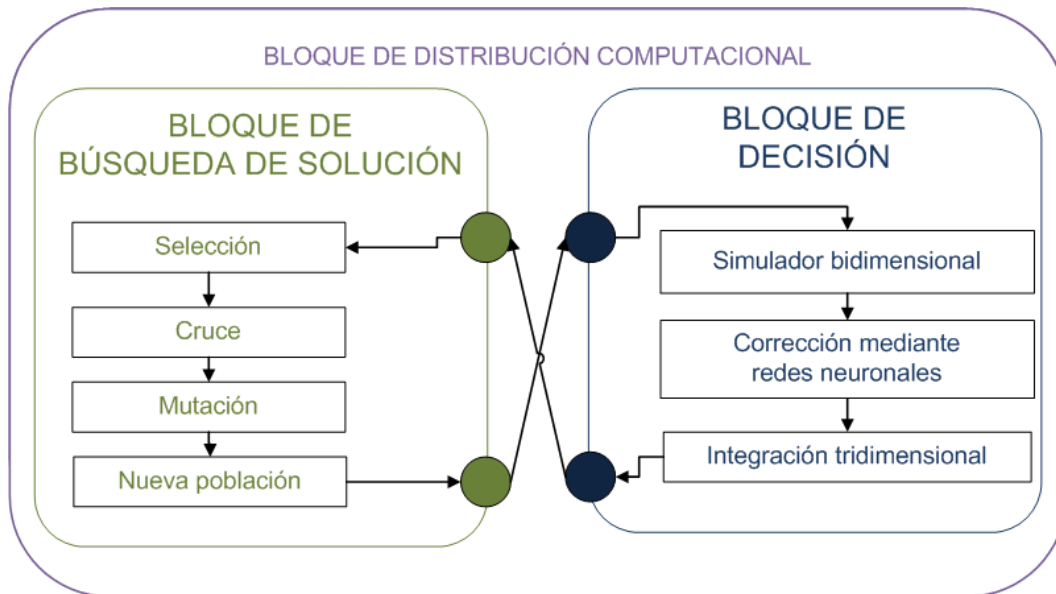


Figura 3.1: Configuración del entorno de diseño aplicado al problema de diseño de aerogeneradores

3.3.1. Simulador

En la selección del simulador se ha primado un coste computacional reducido, permitiendo realizar el proceso evolutivo en tiempos razonables. Para ello se recurrió a un simulador empleado se base en la teoría del elemento de pala combinada con un solver de flujo potencial bidimensional. De tal forma que el proceso de cálculo se divide en la evaluación bidimensional de cada sección de la pala y la integración de este resultado a lo largo de la pala, incorporando la influencia sobre cada sección de las anteriores secciones.

3.3.1.1. Análisis bidimensional

Para la realización del análisis bidimensional se han seguido las siguientes fases:

1. Análisis del flujo en torno al perfil con la consideración de flujo potencial.
2. Inclusión del efecto de la capa límite.

3. Corrección, si fuese necesario, de las fuerzas debido al desprendimiento de la capa límite.

Para el estudio del flujo en torno al perfil se ha considerado como flujo potencial. Este tipo de flujo se denomina así ya que es posible definir una función potencial Φ mediante la cual se puede representar el campo de velocidades. La condición necesaria para la existencia de la función potencial es que el flujo sea irrotacional, es decir,

$$\Delta\Phi = \nabla \times \vec{v} = 0. \quad (3.1)$$

Si bien la condición de irrotacionalidad en un flujo es difícil de encontrar existen, en algunos flujos, zonas que pueden ser tratadas como si el flujo fuese irrotacional. Para que una partícula, originalmente sin rotación, comience a rotar se requiere de un esfuerzo cortante. Como se vio anteriormente, los esfuerzos de corte τ' están asociados a la viscosidad μ y los gradientes de velocidad en la dirección normal al desplazamiento $\partial \vec{v} / \partial n$.

Así, en las regiones del flujo donde no existan gradientes de velocidad y una viscosidad despreciable, esto es altos números de Reynolds, el flujo puede ser considerado como irrotacional. Los perfiles aerodinámicos inmersos en un fluido pueden considerarse en esta condición, salvo en las regiones de la capa límite donde si que son grandes estos los gradientes de velocidad.

Por lo tanto el comportamiento del flujo puede modelarse mediante la ecuación de Laplace [55]. Para poder resolver el problema es necesario definir las condiciones de contorno requeridas. La primera condición de contorno es la condición de no penetración, esta condición estipula que, sobre las paredes del sólido, la componente normal de la velocidad de una partícula de fluido relativa al sólido debe ser nula, esto es:

$$\mathbf{n} \cdot \vec{v} = \mathbf{n} \cdot \nabla \Phi = 0, \text{ en la frontera del sólido.} \quad (3.2)$$

donde \mathbf{n} es el vector normal a la superficie del sólido. La segunda condición de contorno se define como una condición de regularidad en el infinito, esto es

$$\lim_{\|\vec{R}\| \rightarrow \infty} \vec{v} = \vec{v}_{\infty} \quad (3.3)$$

siendo \vec{R} el vector de posición y \vec{v}_{inf} la velocidad de referencia en las zonas no afectadas por la presencia del cuerpo sumergido.

El método utilizado para la resolución de este problema es el método de paneles. Éste método fue inicialmente propuesto por Hess y Smith en 1966 [56] y sólo requiere la el análisis de los elementos que conforman la frontera para conocer las características del flujo en todo el dominio. Así la resolución de la ecuación de Laplace se realiza mediante la superposición de soluciones particulares del flujo de cada uno de los elementos o paneles en los que se descompone la frontera.

Así en cada uno de los elementos o paneles se calcula el valor de la fuerza o sumidero para conseguir cumplir las condiciones de no penetración en la frontera y la condición de Kutta [57], igual velocidad de salida en la cara de succión y presión del perfil. Finalmente el problema a resolver es un sistema de ecuaciones lineales que puede escribirse como:

$$[A] \times [q] = [b], \quad (3.4)$$

siendo $[A]$ la matriz de influencia entre los distintos elementos o paneles, $[q]$ el valor de la fuente o sumidero en el panel y $[b]$ la condición de contorno.

Las fuerzas aerodinámicas generadas sobre el perfil se obtienen mediante la integración de la presión en la superficie del perfil. Esta presión es obtenida mediante el estudio de la variación de la energía cinética del fluido con la consideración de flujo potencial. Se han introducido los efectos viscosos mediante el uso de métodos clásicos integrales de capa límite, Thwaites [58], Cebeci [59] y Head [60] que se utilizan en el caso de capa límite laminar o turbulenta respectivamente. Tras esto, el coeficiente de resistencia aerodinámica se calcula usando la fórmula de Squire-Young [61][62].

En un flujo potencial se desprecian las fuerzas viscosas, por lo que no se contempla una importante contribución a la resistencia al avance del perfil. Los métodos empleados en este caso para introducir estos efectos[63] se basan en la ecuación integral de Von Karman puede escribirse como:

$$H = \frac{\delta^*}{\theta} \quad C_f = \frac{\tau_f}{\frac{1}{2}\rho U_e^2} \quad \frac{dU}{dt} + \frac{1}{U} \frac{dU_e}{dx} \theta (2 + H) = \frac{C_f}{2} \quad (3.5)$$

Esta ecuación contiene tres incógnitas, espesor de desplazamiento (δ^*), espesor del momento (θ), y esfuerzo cortante (C_f), por lo que para resolverla es necesario reducir este número de incógnitas.

El método de Thwaites [64] arranca de la forma adimensional de la ecuación de Von Karman:

$$\frac{U_e \theta d\theta}{v dx} + \frac{\theta^2}{v} \frac{dU_e}{dx} (2 + H) = \frac{\tau_f \theta}{\rho U}, \quad (3.6)$$

y define un parámetro λ como

$$\lambda = \frac{\theta^2}{v} \frac{dU_e}{ds}. \quad (3.7)$$

De forma que la ecuación integral se puede escribir como

$$U_e \frac{d}{dx} \frac{\lambda}{\frac{dU}{dx}} = 2 \left(\frac{\tau_f \theta}{\rho U_e} - \lambda (H(\lambda) + 2) \right) = 2 (S(\lambda) - \lambda (H(\lambda) + 2)) = F(\lambda) \quad (3.8)$$

Thwaites combina resultados analíticos y experimentales para una definición explícita de F ,

$$F(\lambda) = 0,45 - 6\lambda. \quad (3.9)$$

Sustituyendo e integrando en la ecuación anterior se obtiene que

$$\theta^2 = \frac{0,45v}{U_e^6(x)} \int_0^x U_e^5(x) dx. \quad (3.10)$$

El ajuste para H y S lo dan por Cebeci y Bradshaw [65] de la forma:

para $\lambda > 0$	para $\lambda \leq 0$	
$S = 0,22 + 1,57\lambda - 1,80\lambda^2$	$S = 0,22 + 1,40\lambda + 0,018 \frac{\lambda}{\lambda + 0,107}$	(3.11)
$H = 2,61 - 3,75\lambda + 5,24\lambda^2$	$H = 2,088 + \frac{0,0731}{\lambda + 0,14}$	

Con lo que el coeficiente de fricción se puede calcular en cada punto como

$$C_f = \frac{2\mu}{\rho U_e \theta} S(\lambda). \quad (3.12)$$

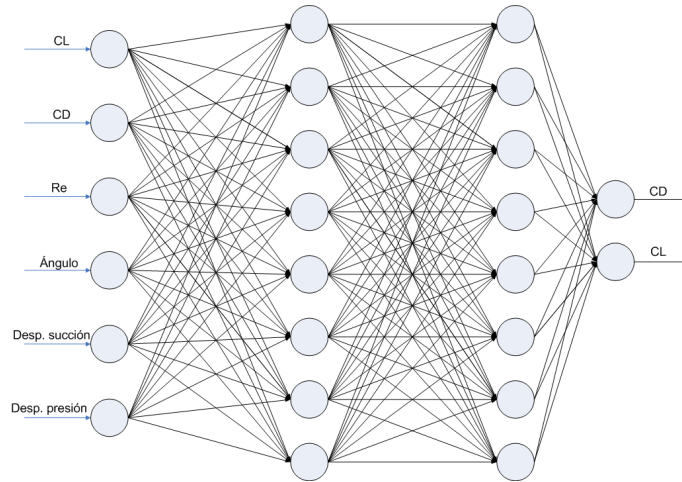


Figura 3.2: Representación de la red neuronal empleada en el ensayo

El método de Head [60] se emplea cuando los efectos de la turbulencia crecen y el método de Thwaites pierde precisión. Para aplicarse se define un parámetro de forma H como

$$H = \frac{\delta - \delta^*}{\theta}. \quad (3.13)$$

Y el coeficiente de fricción resulta entonces

$$C_f = 0,246 \cdot 10^{-0,678H} \left(\frac{U_e \theta}{\nu} \right)^{-0,268} \quad (3.14)$$

3.3.1.2. Corrección mediante redes neuronales artificiales

Sin embargo, el amplio rango de ángulos de ataque que aparecen en los perfiles de la pala, hace que en algunos de ellos, especialmente aquellos de mayor valor, se produzca el desprendimiento de la capa límite. Cuando esto ocurre la consideración de flujo potencial deja de ser válida introduciendo grandes errores. Para corregir estas desviaciones se ha buscado un perfilado no lineal de correlación a través de la introducción de un modelo del mismo, en este caso en particular se ha hecho uso de una red neuronal perceptrón multicapa. Las redes neuronales artificiales son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el

sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida [66]. Una de las características fundamentales de las redes neuronales artificiales es su capacidad de perfilar una función a partir de los ejemplos que se le proporcionan, sin hacer suposiciones a priori sobre los modelos y relaciones que subyacen en el sistema analizado [67]. Un perceptrón o neurona artificial puede definirse como un clasificador. En él las entradas son sumadas linealmente y el resultado es filtrado mediante una función de activación no lineal. Así el perceptrón multicapa es una red neuronal artificial formada por múltiples capas, esto le permite resolver problemas que no son linealmente separables. Estas capas pueden clasificarse en tres tipos:

- *Capa de entrada:* Constituida por aquellas neuronas que introducen los patrones de entrada en la red. En estas neuronas no se produce procesamiento.
- *Capas ocultas:* Formada por aquellas neuronas cuyas entradas provienen de capas anteriores y las salidas pasan a neuronas de capas posteriores.
- *Capa de salida:* Neuronas cuyos valores de salida se corresponden con las salidas de toda la red.

En el caso concreto que se presenta, la red neuronal se ha implementado con seis neuronas de entrada, dos capas ocultas de ocho neuronas y dos salidas (coeficiente de sustentación y de resistencia). Las entradas a la red se corresponden con: el coeficiente de sustentación calculado, el coeficiente de resistencia calculado, el número de Reynolds, el ángulo de ataque, el punto de desprendimiento en la cara de succión y el punto de desprendimiento en la cara de presión.

Para entrenar la red neuronal se han empleado 450 valores obtenidos de resultados publicados de los perfiles NACA 2410, NACA 0009, NACA 2415, NACA 2541, CLARKY, ClarkySM y DAE11 [68]. Después de 1000 pasos de entrenamiento, se ha reducido el error medio inicial de 14,5 % a un 5 %, permitiendo obtener una precisión adecuada en los resultados con un coste computacional menor que un solver de flujo turbulento.

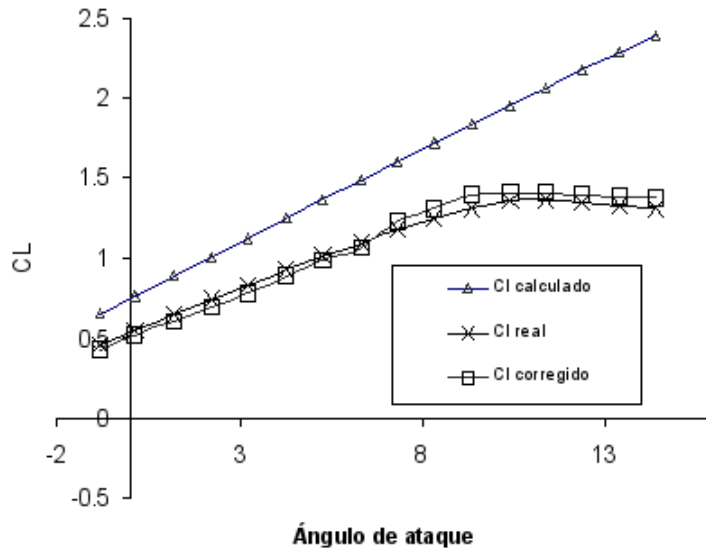


Figura 3.3: Coeficiente de sustentación real, calculado y corregido para el perfil NACA 6409. La corrección se realiza por medio de la red neuronal.

3.3.1.3. Cálculo tridimensional

Para extrapolar los resultados bidimensionales a la pala real es necesario considerar no sólo las distintas secciones, sino también el efecto de la circulación en la dirección de la pala y el de la estela. Con el objeto de incorporarlos se aplica la corrección de Prandtl [69] [70] que modifica el ángulo de ataque y, por tanto, los coeficientes de sustentación y resistencia. Para ello se introducen los efectos del desprendimiento de punta de pala a través de la función de Prandtl:

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos \left(\exp \left(-\frac{B(R-r)\sqrt{1+\lambda^2}}{2R} \right) \right). \quad (3.15)$$

Esta función toma valores que van desde cero en la punta hasta uno en la base de la pala. Estos valores vienen dados por el efecto del desplazamiento del flujo que se produce en la dirección longitudinal de la pala. Un modelo mucho más realista fue propuesto posteriormente por Goldstein [71] que introdujo un torbellino en la estela con el objeto de incorporar los efectos de la circulación sobre la pala. Para considerar este efecto Glauert [72] aproximó la función teniendo en cuenta los efectos del

desprendimiento de punta de pala mediante la siguiente función:

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos \left(\exp \left(-\frac{B(R-r)}{2R \cdot \sin(\Phi)} \right) \right). \quad (3.16)$$

en donde $\Phi = \Phi(r)$ es el ángulo entre la velocidad relativa en la sección y el plano del rotor.

En el modelo propuesto inicialmente por Glauert la función de pérdida en punta de pala, F se expresa como una relación entre el promedio de la velocidad inducida a lo largo de la pala y la velocidad inducida en la sección considerada,

$$F = \frac{\bar{a}}{a_B}, \quad (3.17)$$

en donde a_B es la modificación de la velocidad axial en cada sección y

$$\bar{a} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} a d\theta. \quad (3.18)$$

Es necesario destacar que con esta definición, en el caso de un rotor con un número infinito de palas, a_B y \bar{a} son iguales. Es por ello que posteriormente se modificó la definición de F para hacerla corresponder con una diferencia entre ambos valores. Por lo tanto la función F se define a través de dos ecuaciones diferentes, una para el momento angular y otra para el axial.

Con el objeto de integrar esta corrección dentro del simulador desarrollado se parte del cálculo inicial de la fuerza y momento mediante la teoría del elemento de pala, de tal forma que:

$$\frac{dT}{dr} = BF_n = \frac{1}{2} \rho c B U_{rel}^2 C_n \quad (3.19)$$

$$\frac{dM}{dr} = BF_t r = \frac{1}{2} \rho c B r U_{rel}^2 C_t \quad (3.20)$$

donde F_n y F_t son las fuerzas sobre la sección en la dirección axial y tangencial respectivamente, y C_n y C_t son los correspondientes coeficientes adimensionales de

fuerza. A partir del triángulo de velocidades sobre el elemento de pala, figura 3.4, se obtiene que:

$$\sin(\phi) = \frac{U_{\text{inf}}(1 - a_B)}{U_{\text{rel}}} \text{ y } \cos(\Phi) = \frac{\Omega r(1 + a'_B)}{U_{\text{rel}}}, \quad (3.21)$$

donde la velocidad inducida se define como:

$$W_i = (-a_B U_{\text{inf}}, -a'_B \Omega r). \quad (3.22)$$

Usando las relaciones anteriores se obtiene que

$$V_{\text{rel}}^2 = \frac{U_{\text{inf}}^2(1 - a_B)^2}{\sin^2(\phi)} = \frac{U_{\text{inf}}(1 - a_B)\Omega r(1 + a'_B)}{\sin(\phi)\cos(\phi)}. \quad (3.23)$$

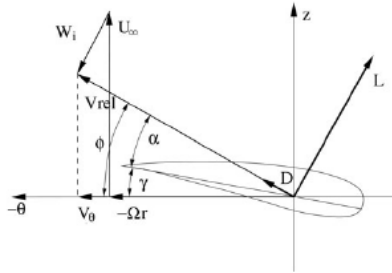


Figura 3.4: Sección transversal del elemento de pala

Introduciendo la relación anterior en las ecuaciones 3.19 y 3.20 se obtiene que

$$\frac{dT}{dr} = \frac{\rho B c U_{\text{inf}}^2 (1 - a_B)^2}{2 \sin^2(\phi)} C_n, \quad (3.24)$$

$$\frac{dM}{dr} = \frac{\rho B c U_{\text{inf}} (1 - a_B) \Omega r^2 (1 + a'_B)}{2 \sin(\phi) \cos(\phi)} C_t. \quad (3.25)$$

Si se aplica la teoría del momento axial, la carga axial puede calcularse como

$$\frac{dT}{dr} = \int_0^{2\pi} \rho (U_{\text{inf}} - U_{\text{wake}}) U_D r d\theta, \quad (3.26)$$

donde $U_D = U_{\text{inf}}(1 - a)$ es la velocidad axial respecto al plano del rotor y $U_{\text{wake}} = U_{\text{inf}}(1 - 2a)$ es la velocidad axial en la estela. Integrando estos valores e introduciendo la definición de F en la función de la carga axial, ésta resulta

$$\frac{dT}{dr} = 4\pi r \rho U_{\text{inf}}^2 a_B F (1 - \epsilon_1 a_B F), \quad (3.27)$$

donde

$$\epsilon_1 = \frac{\overline{a^2}}{\overline{aa}}. \quad (3.28)$$

Aplicando el desarrollo anterior a la ecuación del momento se obtiene

$$\frac{dM}{dr} = \int_0^{2\pi} \rho (U_{\text{inf}} - V_{\text{wake}}) U_D r^2 d\theta, \quad (3.29)$$

siendo $V_{\text{wake}} = 2\Omega r a'$ la velocidad tangencial inducida en la estela. Integrando la ecuación anterior se obtiene

$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^3 \rho U_{\text{inf}} a'_B F (1 - \epsilon_2 a_B F), \quad (3.30)$$

donde

$$\epsilon_2 = \frac{\overline{aa'}}{\overline{\overline{aa'}}}. \quad (3.31)$$

A partir del modelo planteado por Glauert, que sólo consideraba la influencia de efecto de punta de pala sobre la velocidad inducida, se han planteado diversas correcciones para el mismo, como son los modelos propuestos por Wilson [73] y Vries [74].

En el caso de los aerogeneradores reales con un número finito de palas, la velocidad axial en la punta de pala, donde se generan los torbellinos que pasan a la estela, no tiene un valor nulo. Es por ello que el ángulo del flujo, ϕ_R en el extremo del álabe no es cero. Desde el punto de vista físico, la fuerza en estas zonas tiende a cero debido al flujo existente entre la cara de presión y la de succión que tiende a igualar la presión entre ambas caras en estas regiones. Para incluir estos efectos Shen [70] propone calcular los coeficientes de fuerza como:

$$C_n^r = F_1 C_n \quad C_t^r = F_1 C_t \quad (3.32)$$

donde la función F_1 es una corrección a los resultados del perfil bidimensional. Introduciendo estos valores en las ecuaciones anteriores y considerando $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ se obtiene que

$$\frac{a'_B F (1 - a_B F)}{(1 + a'_B)(1 - a_B)} = \frac{\sigma C_t}{4 \sin(\phi) \cos(\phi)} F_1 \quad (3.33)$$

$$\frac{a_B F (1 - a_B F)}{(1 - a_B)^2} = \frac{\sigma C_n}{4 \sin^2(\phi)} F_1 \quad (3.34)$$

donde C_n y C_t son los coeficientes de fuerza obtenidos directamente de los datos bidimensionales del perfil. La función F_1 es la función de pérdidas inducidas por los efectos de punta de pala. Partiendo de la propuesta por Glauert se puede formular como:

$$F_1 = \frac{2}{\pi} \arccos \left[\exp \left(-g \frac{B(R-r)}{2R \sin(\phi_R)} \right) \right] \quad (3.35)$$

La función F_1 introduce una variación sobre las interferencias en las velocidades de tal forma que finalmente pueden escribirse como

$$a_B = \frac{2 + Y_1 - \sqrt{4Y_1(1-F) + Y_1^2}}{2(1 + FY_1)} \quad (3.36)$$

$$a'_B = \frac{1}{\frac{(1-aF)Y_2}{1-a} - 1} \quad (3.37)$$

donde

$$Y_1 = 4F \frac{\sin^2(\phi)}{\sigma C_n F_1} \quad \text{y} \quad Y_2 = 4F \frac{\sin(\phi) \cos(\phi)}{\sigma C_t F_1}, \quad (3.38)$$

siendo C_n y C_t los coeficientes de fuerza de los perfiles bidimensionales.

3.3.2. Definición de la pala

La pala se define a partir de la determinación inicial del diámetro del aerogenerador. Además se requiere definir como cambian los valores de la cuerda, twist o del perfil a lo largo de la pala. El procedimiento de cálculo descrito permite determinar el ángulo óptimo para cada sección, así sólo es necesario determinar el perfil y la cuerda de cada sección que constituye el álabe. En este caso se han definido cinco secciones

de control intermedias, de tal modo que el resto de secciones son calculadas mediante interpolación de las mismas. Para definir el perfil de la pala se ha seguido una formulación basada en los perfiles NACA de cuatro dígitos. Cada individuo queda definido, por lo tanto, mediante 26 genes, uno para determinar el radio de la pala y los otros 25 para la forma. Cada sección de control se define mediante 5 genes, los cuatro primeros determinan el perfil y el último define la cuerda.

3.3.3. Parámetros del algoritmo genético

En las secciones anteriores se han definido las características y funcionamiento de los algoritmos genéticos. En la aplicación práctica a este problema es necesario definir los valores utilizados para cada uno de los parámetros del algoritmo.

- **Selección.** La selección se ha llevado a cabo siguiendo un procedimiento de *torneo* para realizar esta selección. En este caso se ha considerado una ventana de cuatro individuos.
- **Cruce.** Los individuos seleccionados se cruzan en un único punto.
- **Mutación.** La dificultad de la exploración del espacio de búsqueda ha determinado una probabilidad de mutación elevada, un 10 % con el objeto de aumentar la exploración del mismo. En caso de producirse una mutación en un individuo, uno de sus genes es sustituido por otro generado aleatoriamente.
- **Tamaño de la población y generaciones.** Este experimento ha introducido una población de 200 individuos y 80 generaciones.

3.3.3.1. Resultados

En el problema planteado no se han considerado pérdidas mecánicas ni de la conversión de energía mecánica a eléctrica, es por ello que los resultados obtenidos se han situado próximos a los máximos teóricos alcanzables, considerando el límite de Betz como la potencia máxima alcanzable para cada velocidad. Así la mejor pala encontrada, figura 3.5, proporciona el 79,76 % de este máximo teórico.

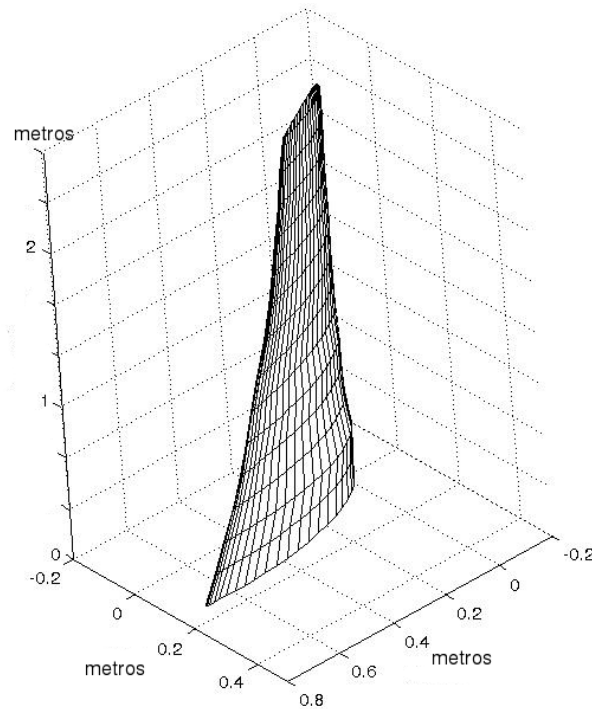


Figura 3.5: Configuración de la mejor pala encontrada

En la figura 3.6 se muestran los datos del proceso de evolución del problema. Después de la generación 65 la población se estabiliza genéticamente, el valor de la calidad media crece debido a que el número de individuos no válidos disminuye. Los valores obtenidos de potencia son mayores que los que se obtendrían en el caso real debido a la simplificación del problema mecánico considerado, sin embargo los resultados pueden considerarse cualitativamente válidos ya que estas simplificaciones son comunes a todos los individuos.

Uno de los principales problemas del algoritmo es que codifica individuos no válidos. Lo que hace que en las primeras generaciones el proceso evolutivo tienda a reducir el número de individuos no válidos, figura, 3.7, y sólo a partir de la estabilización de la población se comience a mejorar la calidad de los individuos. Por este motivo, en futuros experimentos será necesario replantear el sistema de definición de las alternativas para evitar la aparición tan elevada de elementos no válidos, sin que ello implique una reducción o restricción sobre el espacio de búsqueda.

Analizando la variabilidad de la población final, figura 3.8, se observa que ésta es

3.3. Diseño de aerogeneradores mediante algoritmos genéticos canónicos

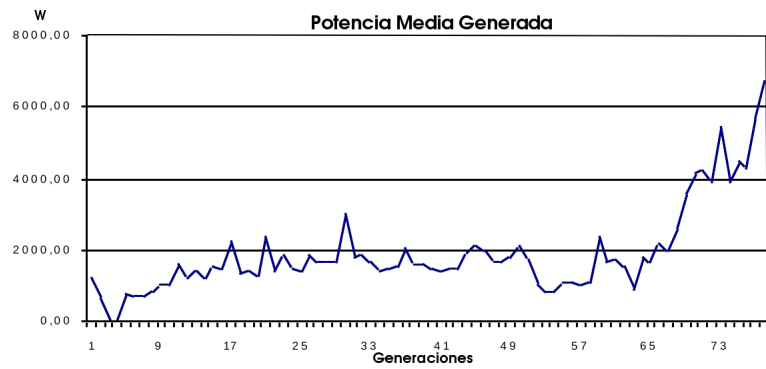


Figura 3.6: Evolución del valor medio de la potencia generada en cada generación.



Figura 3.7: Evolución del número de individuos válidos.

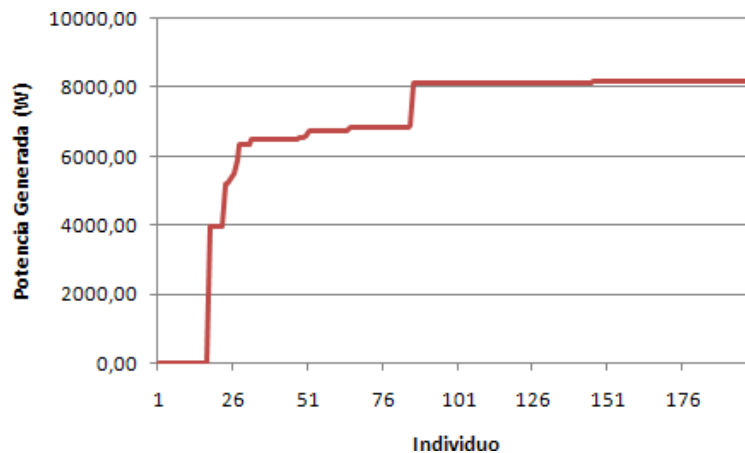


Figura 3.8: Distribución de la calidad de la población en la generación 80.

muy escasa. Esto es debido a su tendencia a agruparse en torno a máximos locales, llevando que amplias regiones del espacio de búsqueda queden inexploradas o con una explotación deficiente, especialmente en el caso de existir un número elevado de máximos y valles en la función de calidad como es el caso presentado. Así se han detectado algunas dificultades en su aplicación a estos problemas, los dos principales han sido el difícil control de la exploración y su tendencia a estancarse en máximos locales.

Las dificultades detectadas en esta prueba plantean unos requerimientos mayores para el control de la exploración y la explotación del proceso evolutivo que el que proporciona un algoritmo genético canónico. Por este motivo en la siguiente sección se analizan alternativas al mismo y su aplicación a un nuevo problema de optimización de aerogeneradores.

3.4. Mejoras en el proceso de búsqueda

En las secciones anteriores se han presentado los algoritmos genéticos como estrategia de búsqueda y su aplicación en un entorno de diseño automático para la optimización de palas de aerogeneradores. Los resultados obtenidos en esta prueba han sido satisfactorios, sin embargo una serie de problemas detectados tales como el estanca-

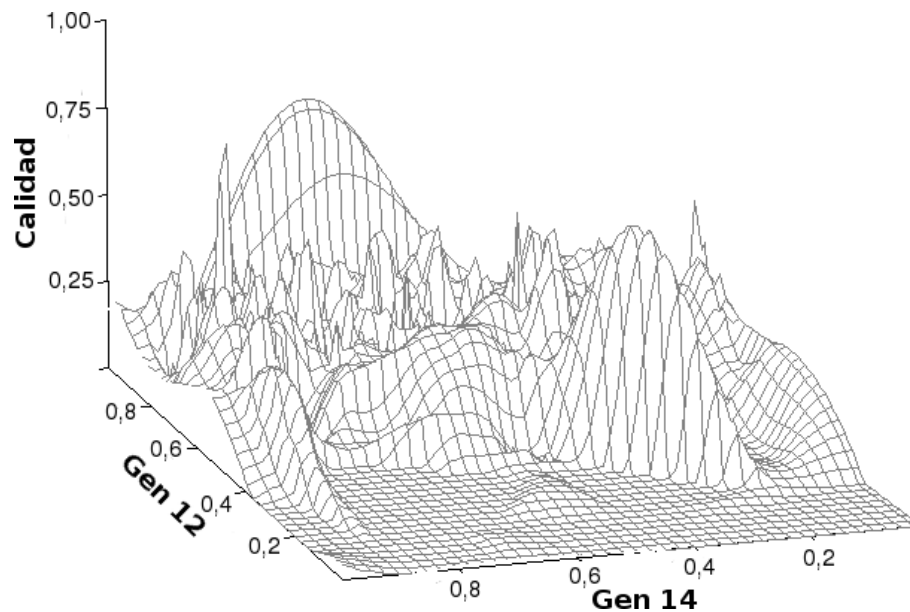


Figura 3.9: *Función de calidad respecto los genes 12 y 14, con los demas genes fijos, en el experimento de diseño de aerogeneradores*

miento de la población o tendencia a agruparse en máximos locales, hacen que para los complejos espacios de búsqueda de los problemas aerodinámicos sea de interés el estudio de la utilización de otras estrategias de búsqueda.

En los métodos evolucionistas tradicionales, como son los algoritmos genéticos, la presión evolutiva la imponen la selección, cruce y mutación que determinan con qué velocidad la población converge a una solución. A mayor presión, más rápido converge la población, y más fácilmente la solución cae en un mínimo local. La presión evolutiva está relacionada con el ratio entre explotación y exploración para un espacio de soluciones determinado. En el fondo, se quiere alcanzar el óptimo con el mínimo número de muestras, lo que implica una alta presión evolutiva y una alta explotación, pero sin caer en mínimos locales, lo que hace necesario una mayor exploración.

El equilibrio entre exploración y explotación es especialmente importante cuando los requerimientos computacionales de la evaluación son muy altos, lo que hace que el tamaño de las poblaciones sean muy reducidos. De hecho, se vuelve crítico cuando las funciones de calidad se caracteriza por tener regiones muy planas combinadas con máximos dispersos, que es el caso que nos ocupa, como se ve en la figura 3.9.

Se han desarrollado diferentes aproximaciones para abordar estos problemas, que incluyen el uso de algoritmos paralelos que introducen restricciones a las regiones de búsqueda de diferentes subpoblaciones o razas. Distintas aproximaciones a los mismos se han abordado en [75] y [49], en donde se estudian procedimientos de división del espacio de búsqueda y la creación de nichos poblacionales, básicamente todos estos modelos se basan en desarrollar diferentes subpoblaciones en torno a diferentes mínimos o máximos locales. Estas soluciones no dejan de ser soluciones hechas a medida que tratan de controlar el elevado número de parámetros de un genético que afectan al equilibrio exploración - explotación. Aquí, para controlar esta relación de una forma más directa se ha optado por la utilización de un algoritmo con menos parámetros y más relacionados directamente con este equilibrio, los algoritmos macroevolutivos.

3.4.1. Algoritmos macroevolutivos

Un algoritmo macroevolutivo es un tipo reciente de algoritmo evolutivo que fue propuesto por Marín y Solé [76] en 1999. La diferencia fundamental de esta aproximación estriba en que mientras que en los otros algoritmos evolutivos una población de individuos evoluciona mediante el principio de que cuanto mejor es un individuo más probabilidades tiene de reproducirse, en los algoritmos macroevolutivos se considera una nueva escala evolutiva, la de especies, y así un ecosistema formado por un conjunto de especies evoluciona mediante la extinción de las peores y la apropiación de su nicho ecológico por parte de especies nuevas, esto es, en vez de favorecer a las nuevas se eliminan las peores. Aunque tanto en las implementaciones originales de los autores como en la realizada en este trabajo una especie está formada por un único individuo, es importante tener esta diferencia de concepto en mente porque es la base de los algoritmos macroevolutivos, ya que plantea un tratamiento diferente del proceso evolutivo y representa una puerta abierta a que cada especie esté formada por varios individuos y evolucione independientemente.

El funcionamiento de los algoritmos macroevolutivos se presenta en el siguiente esquema:

Sean:

d , la dimensionalidad del espacio de búsqueda

$f : \mathfrak{R}^d \rightarrow \mathfrak{R}$, la función de calidad

$p_i = \{p_i^1, \dots, p_i^d\}$, la especie i

$W_{i,j}$, la conexión entre la especie i y la j

h_i , el coeficiente de supervivencia para la especie i

p_b , es una especie con un coeficiente de supervivencia ≥ 0

p_n , es una especie generada aleatoriamente

$\zeta \in [0, 1]$ y $\lambda \in [-1, 1]$, números aleatorios con distribución uniforme

p y τ , parámetros del algoritmo

Estructura del algoritmo macroevolutivo

1. $t \leftarrow 0$
2. Inicializar y evaluar cada p_i
3. Mientras no se cumpla el criterio de parada:

a) Calcular la matriz de conexiones W , donde

$$W_{i,j} = \begin{cases} \frac{f(p_i) - f(p_j)}{|p_i - p_j|}, & \text{si } |p_i - p_j| \neq 0 \\ 0, & \text{si } |p_i - p_j| = 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

b) Calcular el coeficiente de supervivencia

$$h_i(t) = \sum_{j=1}^p W_{i,j}(t) \quad (3.40)$$

c) Calcular el estado,

$$S_i(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{si } h_i(t) > 0 \\ 0, & \text{si } h_i(t) \leq 0 \end{cases} \quad (3.41)$$

d) Colonización

$$p_i(t+1) = \begin{cases} p_i(t), & \text{si } S_i(t+1) = 1 \\ p_b(t) + \rho\lambda(p_b(t) - p_i(t)), & \text{si } S_i(t+1) = 0 \text{ y } \zeta > \tau \\ p_n, & \text{si } S_i(t+1) = 0 \text{ y } \zeta \leq \tau \end{cases} \quad (3.42)$$

$$e) \ t \leftarrow t + 1$$

Este proceso se inicia con el cálculo de la matriz de conexión, en la que cada elemento mide la diferencia de calidades entre dos especies ponderándola por la distancia en el espacio de soluciones que existe entre ellas, de forma que dicha diferencia de calidad es más importante cuanto más cerca se encuentran las especies en dicho espacio. Si la suma de todos los elementos de la matriz de conexión en los que interviene una especie es positiva (coeficiente de supervivencia positivo, según la definición de los autores), dicha especie sobrevive [77]. En caso contrario, se extingue. Si sobrevive se mantiene tal cual en la siguiente generación. Si se extingue es sustituida por una nueva especie colonizadora que puede ser generada aleatoriamente o puede derivarse de la especie extinta y de otra cualquiera que sobrevive.

Hay dos parámetros que determinan el funcionamiento del algoritmo macroevolutivo:

- λ , que marca la desviación máxima que una nueva especie generada a partir de una extinta y una superviviente puede tener respecto a ésta última.
- τ , que controla el porcentaje de especies aleatorias que se generan en cada generación.

En definitiva, λ determina cómo se lleva a cabo la explotación, es decir, cómo se realiza la búsqueda en las proximidades de individuos ya existentes. Cuánto más pequeño sea, más cerca estarán las nuevas especies de las supervivientes y, por tanto, mayor será la presión evolutiva, puesto que más rápido se abandonarán las zonas del espacio de búsqueda con aparentemente peores especies.

Por su parte, τ controla el balance entre explotación y exploración (búsqueda de nuevo material genético, nuevos individuos no necesariamente cerca, o incluso preferentemente alejados, de los ya existentes). Si es muy grande se generarán muchas especies aleatoriamente y estaremos ante una evolución guiada por la exploración, lo cual es útil para buscar nuevo material genético. Si es muy pequeño se generarán pocas especies aleatoriamente y estaremos ante una evolución guiada por la explotación. Lo

habitual es que este parámetro actúe como una “temperatura” y decrezca con el tiempo, de forma que se empiecen generando muchos individuos aleatoriamente y, a medida que avanza el proceso evolutivo, cada vez se generen menos individuos aleatorios, aumentando la explotación.

Una ventaja de los algoritmos macroevolutivos respecto a otros es que solamente hay dos parámetros que determinan su funcionamiento, con lo que ajustarlos a un problema determinado es mucho más fácil. Pensemos, por ejemplo, en los algoritmos genéticos, donde es necesario seleccionar el tipo de selección, el tipo de cruce, el tipo de mutación, la probabilidad con la que se realizan ambos operadores genéticos, el tipo de reemplazo, etc., y donde además muchos de estos factores tienen a su vez otros parámetros que ajustar. Otra ventaja que presentan los algoritmos macroevolutivos es su posibilidad de evolucionar separadamente en subpoblaciones o razas aisladas con el objeto de favorecer la exploración. Para incrementar la explotación en estos caso se establece un periodo de migración, bien sean local a las razas vecinas o global a todas las razas, donde la mejor alternativa de una raza es copiada a otras razas.

Otra ventaja de los algoritmos macroevolutivos es su particular forma de realizar la búsqueda por el espacio de soluciones, dando la oportunidad a que se reproduzcan todas las especies antes de extinguirse, lo que es muy útil en problemas propensos a caer en óptimos locales. Esto se traduce en que el algoritmo tiene una presión evolutiva regulable y, además, en general menor que los algoritmos genéticos o las estrategias evolutivas, ya que toda especie, antes de desaparecer, puede dejar descendencia en la población con mucha mayor probabilidad que en los otros algoritmos evolutivos. Además, al tener todas las especies supervivientes la misma probabilidad de ocupar el nicho dejado por las que se extinguen, no existe el problema del superindividuo. No sólo la presión es menor, sino que la dinámica de la evolución tiende a generar agrupamientos alrededor de las mejores especies, con lo que la explotación es también muy eficiente, tal y como se estudia en [78].

3.5. Diseño de aerogeneradores mediante algoritmos macroevolutivos

En la sección anterior se han presentado los algoritmos macroevolutivos. La selección del mismo se ha realizado a partir de las dificultades detectadas en el problema de diseño de aerogeneradores mediante algoritmos genéticos. Por ello se han introducido otros algoritmos de búsqueda que permitan una exploración más eficiente en el espacio de búsqueda.

De este modo, se volverá a aplicar la estructura de diseño propuesta al diseño óptimo de aerogeneradores. Con el objetivo de validar el funcionamiento de los algoritmos macroevolutivos se han planteado dos casos test. El primero ha consistido en comparar los resultados obtenidos mediante el procedimiento de diseño propuesto con el óptimo teórico. El segundo ha consistido en resolver el problema de diseño de aerogenerados similar al planteado en las pruebas realizadas con algoritmos genéticos, sin embargo con el objeto de incrementar su dificultad se han introducido ciertas modificaciones en el mismo. Por este motivo se ha incluido un simulador adicional que permita evaluar las características estructurales de la pala y, de este modo, verificar los requerimientos constructivos.

3.5.1. Comparación con el óptimo analítico

En esta primera prueba se pretende validar los resultados del procedimiento de diseño óptimo basado en algoritmos macroevolutivos. Con este objetivo se comparará el óptimo analítico frente al alcanzado por el entorno de diseño. Sin embargo, no es posible calcular analíticamente la mejor pala para el problema planteado en la sección 3.3, es decir para una distribución de velocidades y perfil variable. Por este motivo se plantea el problema del diseño de una pala con un perfil fijo y para un viento constante, de este modo las variables a calcular es el ángulo y la cuerda de cada sección. Así, la posibilidad de conocer el óptimo analítico permite evaluar la capacidad de los algoritmos macroevolutivos de alcanzar el óptimo y no estancarse en un óptimo local.

El cálculo del óptimo teórico se encuentra descrito en [61], llegando a las siguientes

relaciones:

$$16a_B^3 - 24a_B^2 + a_B(9 - 3\lambda r) - 1 + (\lambda r)^2 \quad (3.43)$$

$$\phi = \text{atan} \left(\frac{1 - a_B}{(1 + a'_B)\lambda r} \right) \quad (3.44)$$

$$\frac{c}{R} = \frac{8\pi a_B r \sin^2(\phi)}{(1 - a)BC_n} \quad (3.45)$$

en donde

$$C_n = C_l \cos(\phi) + C_d \sin(\phi). \quad (3.46)$$

Con el objetivo de realizar la comparación se ha considerado un aerogenerador con las siguientes características: $\lambda = 6$, $B = 3$, $Re = 3 \cdot 10^6$ y un perfil NACA 63-415. Adicionalmente para el cálculo del óptimo analítico se ha tomado el ángulo de ataque del viento aparente sobre el perfil que consigue la máxima relación $\frac{C_l}{C_d}$, lo que sucede para un ángulo de 4° .

Por otro lado, las palas optimizadas mediante en entorno de diseño se han definido mediante cinco parámetros, tres para la distribución de la cuerda y dos para el ángulo. De este modo, la cuerda, c , y el giro, θ , de cada sección se calcula como:

$$c = C_0 r^2 + C_1 r + C_2 \quad (3.47)$$

$$\theta = A_0 e^{A_1 r}. \quad (3.48)$$

Estos parámetros están comprendidos en el intervalo $[-1, 1]$, salvo A_1 que está contenido en el intervalo $[-4, 0)$. Partiendo de esta definición de la pala el procedimiento de evaluación de la potencia de la pala ha sido similar al seguido para el problema descrito en el diseño de aerogeneradores mediante algoritmos genéticos.

El proceso de optimización se ha llevado a cabo en 16 nodos del cluster local con procesadores *Dual-Core AMD Opteron(tm) Processor 2212*. Considerando una población de 400 individuos y 500 generaciones distribuidas en dos razas. El proceso de cálculo ha requerido un tiempo de cómputo acumulado de 112 minutos. Este tiempo ha sido dignificativamente menor al de las otras pruebas realizadas debido a que, al utilizar un perfil constante, el simulador bidimensional ha sido sustituido por una función

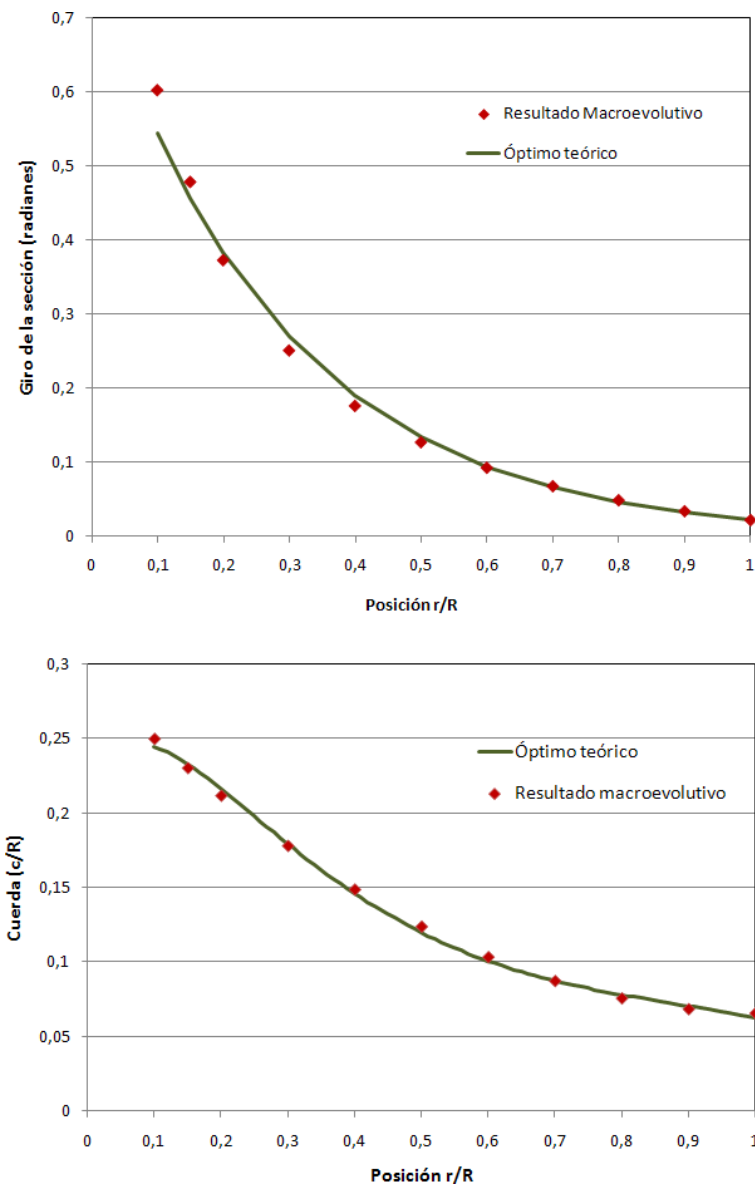


Figura 3.10: Comparación del óptimo analítico frente al óptimo alcanzado mediante el entorno evolutivo de diseño.

que ajusta sus coeficientes de sustentación y resistencia. Los resultados alcanzados se muestran en la figura 3.10, donde se aprecia cómo el ajuste realizado mediante el proceso evolutivo se corresponde con el óptimo analítico de tal forma que la diferencia entre las potencias producidas es de 0.093 %.

El error cuadrático medio de la distribución alcanzada frente a la óptima es de

0,0025 en caso de la cuerda y 0,0043 para el ángulo. Si la distribución de ángulos y cuerdas obtenida analíticamente se ajusta mediante mínimos cuadrados a funciones equivalentes a las utilizadas en el proceso evolutivo, este error disminuye, respectivamente, a 0,0019 y 0,0031. Sin embargo este mejor ajuste no lleva asociado una mejora de la potencia, de tal forma que con esta configuración la potencia es un 0.098 % menor. Este es el motivo que el proceso de diseño no haya convergido a la mejor aproximación a la distribución sino a aquella que lleva a un valor mayor de potencia.

Aunque la existencia de un óptimo analítico hace que no sea necesario utilizar el procedimiento de diseño propuesto, ha permitido validar la capacidad del algoritmo macroevolutivo para localizar el óptimo en este tipo de problemas. De este modo, los resultados obtenidos muestran la práctica coincidencia entre ambos óptimos, el analítico y el obtenido mediante evolución.

3.5.2. Cálculo estructural

Dado a la complejidad de los problemas de diseño óptimo aerodinámico, normalmente se abordan desacoplados de otros análisis, tales como el de resistencia mecánica, requeridos para el diseño completo del modelo. Sin embargo, cuando se busca la automatización completa de este proceso no es posible excluir estos análisis en el estudio de la metodología y requerimientos que se tienen que exigir en este proceso.

Por ello, se ha desarrollado un análisis de resistencia de materiales para considerar la resistencia estructural de las alternativas durante el proceso de optimización. En este sentido se evalúan las fuerzas aerodinámicas y las fuerzas y momentos inerciales en cada una de las secciones de la pala. Este análisis se realiza considerando la unión de la pala con el buje como un empotramiento siguiendo el siguiente esquema:

1. Se determina el eje neutro de cada sección.
2. Se realiza la composición de tensiones normales σ y cortantes τ sobre la sección.
3. Se calcula el momento flector, no se consideran los momentos torsores.

4. Superponiendo las tensiones generadas por los momentos flectores, σ_{M1} y σ_{M2} y las fuerzas de compresión y cortantes, se determinan la posición y valor de la tensión máxima.

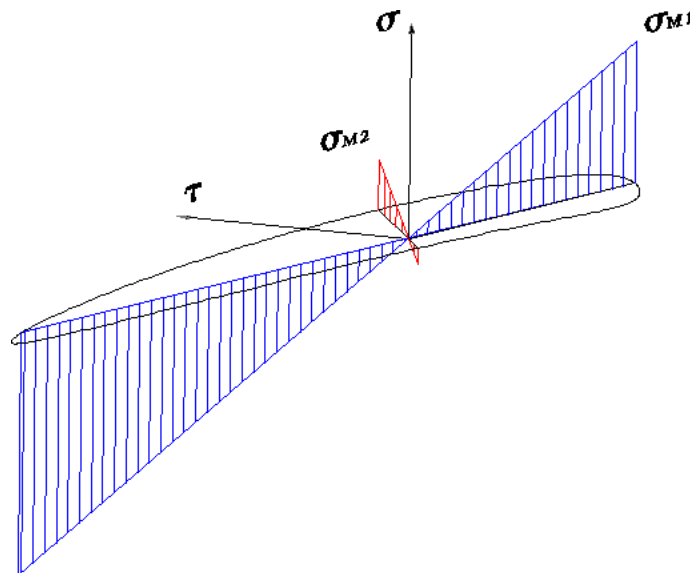


Figura 3.11: Descomposición de fuerzas sobre la pala

La figura 3.11 representa la distribución de fuerzas sobre cada sección. Para estimar la resistencia estructural de la misma sólo se evalúa el punto sometido a mayores esfuerzos.

Los dos simuladores, el aerodinámico y el estructural, proporcionan los valores que permiten valorar cada una de las alternativas, el primero evalúa la energía generada por el aerogenerador y el otro la viabilidad de su construcción, el primer valor proporciona un valor de la calidad y el segundo el cumplimiento de las restricciones del diseño.

3.5.3. Experimento

En este apartado se retoma el problema del diseño de un aerogenerador de un diámetro máximo de 5 metros que se ha analizado en la sección 3.3. En la primera aproximación se ha utilizado un algoritmo genético canónico, sin embargo se detectaron algunas dificultades en el proceso de búsqueda. Por este motivo se ha sustituido por

un algoritmo macroevolutivo y, de este modo, analizar las mejoras que introduce en el proceso de búsqueda. Al igual que en el caso anterior, el experimento propuesto se ha realizado para un emplazamiento específico, en este caso se considera una velocidad del viento con una distribución Weibull con unos parámetros característicos de 7 m/s como velocidad media y un parámetro de forma de valor 2.

Para aplicar el entorno de diseño desarrollado en este trabajo tres parámetros tienen que ser definidos: la función de calidad, las restricciones y cómo se define la forma de la pala.

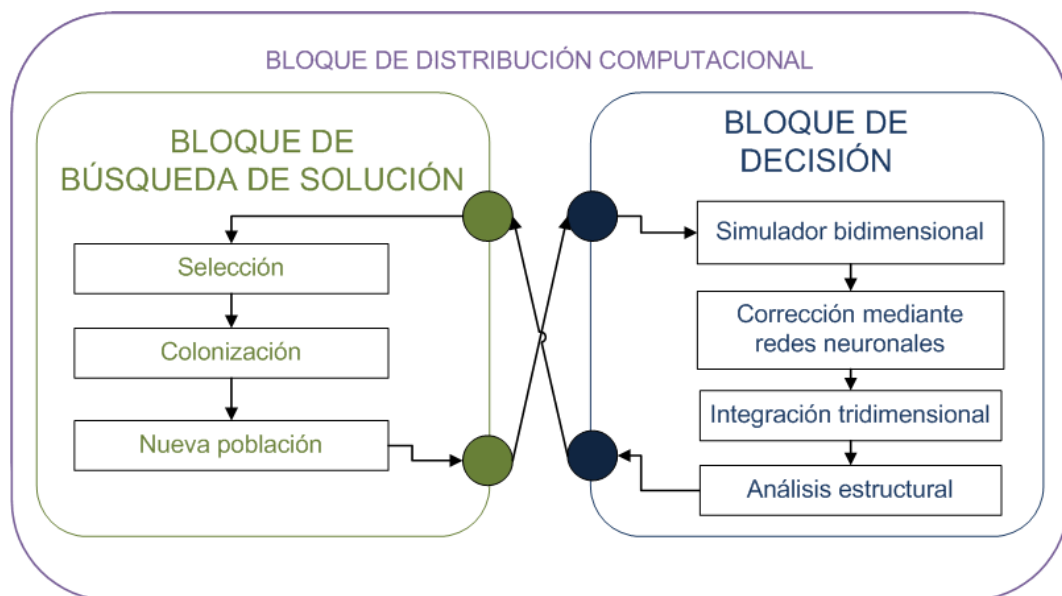


Figura 3.12: Configuración del entorno de diseño aplicado al problema de diseño de aerogeneradores mediante algoritmos macroevolutivos

3.5.3.1. Definición de la pala

Uno de los problemas detectado en el ensayo anterior fue la aparición de individuos no válidos. Estas no conformidades fueron producidas fundamentalmente por el procedimiento de cálculo del ángulo óptimo de de cada sección y por la aparición de grandes saltos en la cuerda o perfil de las secciones contiguas. Por ello se ha optado por definir la forma de la pala a través de una distribución de cuerdas, giro y forma

perfil. De este modo la pala está codificada en el proceso evolutivo mediante un total de 20 genes. Esto es debido a que se ha considerado una distribución parabólica de los valores anteriores, de tal forma que con los valores iniciales y finales junto con el valor y posición del máximo queda definida totalmente la distribución de estos valores. El rango de estos parámetros de búsqueda son:

- Perfiles NACA: desde 0 0 0 0 a 6 6 1 9.
- Ángulos: de -90 a 90 grados.
- Cuerda: de 0 a 0.4 metros.

De este modo la forma de la pala se define con 18 genes, tres secciones: inicial, final y máxima. Los otros dos parámetros adicionales determinan la posición de la sección máxima y la velocidad angular de giro del aerogenerador. Este valor se denomina parámetro λ que mide la relación entre la velocidad de la punta de pala y el viento.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{v} \quad (3.49)$$

Con esta nueva definición se reduce enormemente el tiempo de cómputo al no tener que calcular el ángulo óptimo para cada sección. Además es necesario considerar que este ángulo óptimo lo es únicamente para una condición fija y no para el rango completo de operación.

3.5.3.2. Restricciones

La aplicación a problemas reales de diseño en ingeniería exige no sólo la evaluación de las alternativas sino que tienen que considerarse las restricciones a las que tienen que someterse. Como se ha indicado anteriormente en este caso vamos a introducir efectos de resistencia mecánica, a través de un análisis de esfuerzos estructurales en el simulador y aplicando una restricción sobre el máximo esfuerzo calculado. Para estos aerogeneradores de pequeño tamaño la estructura se ha tomado íntegramente realizada en fibra de vidrio. Sin embargo, se han considerado otros materiales con mayor límite elástico para analizar la influencia en la forma del aerogenerador del material utilizado.

El diseño de la pala no está condicionado por ninguna restricción externa o diseño previo. A lo largo del proceso evolutivo la forma se modifica para buscar el mayor valor en la función de calidad restringida a los condicionantes estructurales.

3.5.3.3. Resultados

En primer lugar se han realizado las pruebas para analizar el comportamiento del macroevolutivo atendiendo al parámetro τ que es el que fundamentalmente regula el comportamiento del proceso evolutivo, controlando la relación explotación/exploración del proceso. En las gráficas 3.13 se muestran distintas configuraciones para el valor de τ . Es necesario indicar que a mayor valor de τ mayor porcentaje de exploración. De este modo en la primera configuración se reduce paulatinamente la exploración hasta hacerse nula al final del proceso, en la segunda, en la mitad de la evolución finaliza la explotación y en la tercera, al final del proceso evolución aún hay un 20 % de explotación.

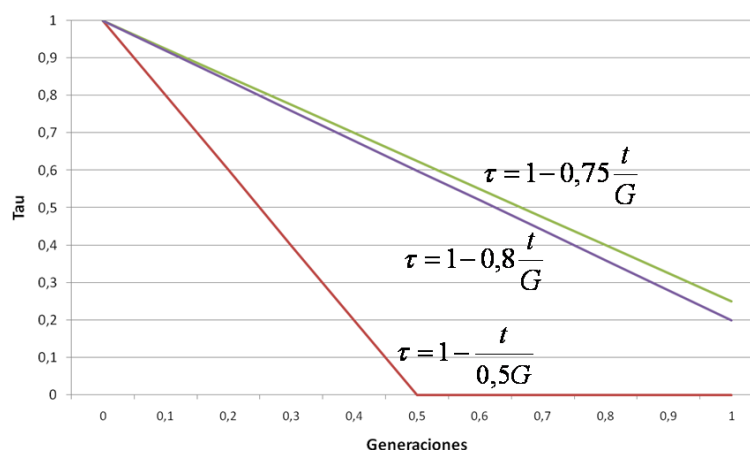


Figura 3.13: Diferentes valores de τ analizados, siendo t la generación actual y G en número total de generaciones.

En la figura 3.14 se muestra como afecta al proceso de evolución el parámetro τ , como puede verse, la dificultad del espacio de búsqueda requiere que la exploración se mantenga durante todo el proceso, ya que si no, la evolución tiene serios problemas para salir de los óptimos locales en los que se estanca.

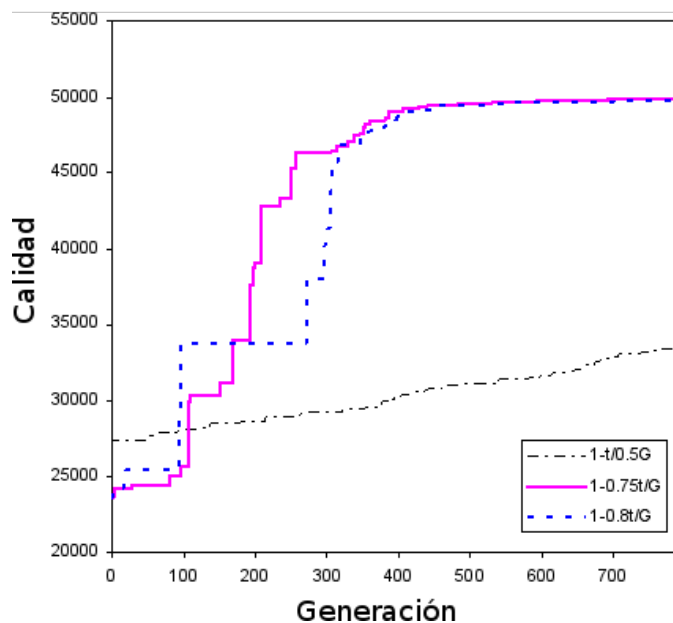


Figura 3.14: Evolución de la calidad para las distintas funciones de τ

Los resultados alcanzados en este trabajo pueden dividirse en dos grupos, unos directamente asociados con el diseño aerodinámico de las palas y otros de análisis de los efectos de los distintos parámetros del algoritmo macroevolutivo sobre la evolución de los resultados. Para ello, se han realizado pruebas adicionales para analizar el proceso evolutivo. En este sentido se han evaluado distintos parámetros como: el número de razas (2 o 4), el número de generaciones (2,500, 5,000, 7,500 o 10,000) y el número de individuos (1024 o 2048 individuos), para evitar los efectos de la distribución inicial de los individuos se han realizado 8 pruebas de cada una de las combinaciones.

En las figuras 3.15, 3.16 y 3.17 muestran algunos de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, mostrándose en la figura 3.18 la representación tridimensional de la mejor pala encontrada. Si bien son los resultados de un problema concreto, debido a sus características semejantes a otros problemas de ingeniería, se pueden extraer algunas conclusiones de los mismos. En primer lugar hay que destacar la importancia del número de generaciones, es decir, de la duración del proceso evolutivo, en los resultados obtenidos. En el proceso evolutivo pueden diferenciarse tres etapas:

- Una breve primera etapa en la que principalmente tiene lugar el proceso de ex-

ploración y la calidad no sufre fuertes cambios.

- La siguiente etapa se inicia cuando empiezan a aparecer individuos de calidad elevada y la explotación empieza a aparecer. En esta etapa se producen saltos grandes en la calidad donde, por efectos de la explotación, aparecen nuevos individuos de calidad elevada.
- En la fase final, la explotación está plenamente operativa, y se van produciendo pequeños y progresivos incrementos en la calidad, debidos, principalmente, a la introducción de pequeñas modificaciones sobre los modelos existentes.

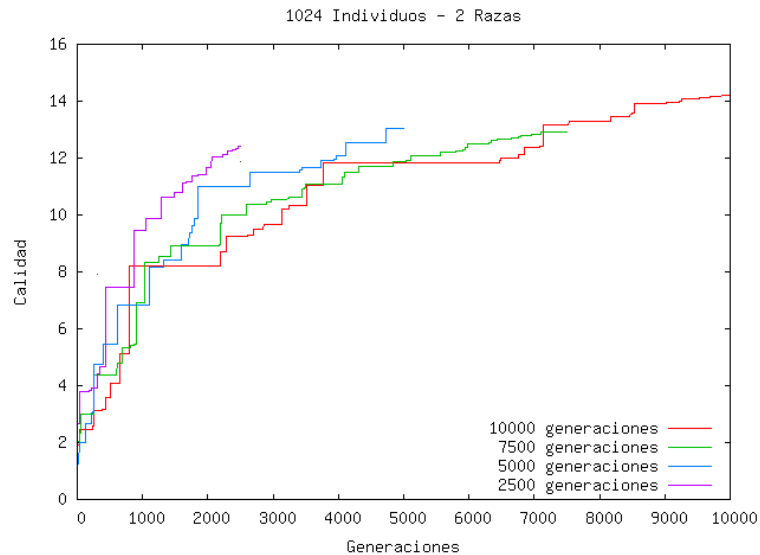


Figura 3.15: Evolución de la calidad con número de generaciones

El problema se caracteriza por tener numerosos óptimos locales, sin embargo no aparecen fuertes gradientes en la función de calidad. Esto hace que el número de individuos y, por tanto, el proceso de exploración, tenga una menor importancia a la hora de localizar los óptimos de la función de calidad. Puesto que el coste computacional de resolución del problema depende directamente del número de individuos y de generaciones será necesario ajustar estos dos parámetros para obtener los mejores resultados. Es por ello que, en los casos como los presentados, donde la explotación es el mecanismo de búsqueda más importante, será necesario determinar la duración mínima del proceso evolutivo y, a partir del mismo, seleccionar el valor mínimo de la población

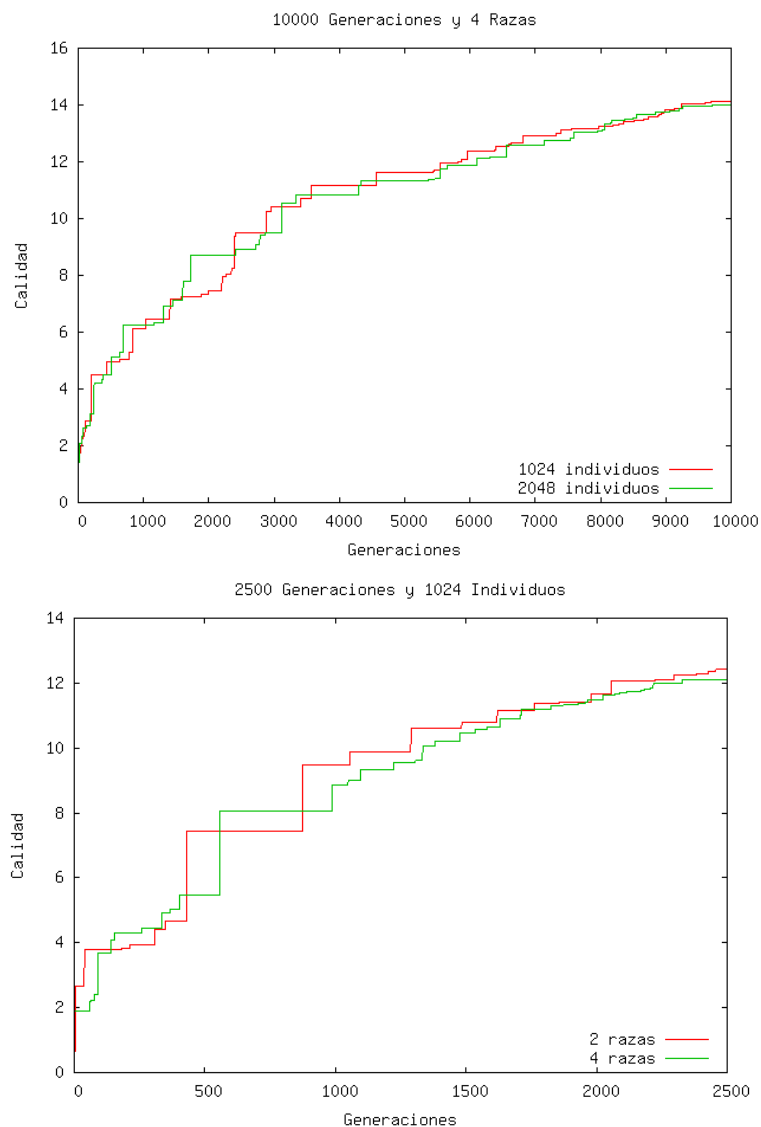


Figura 3.16: Evolución de la calidad con número de individuos y razas

requerida. Como valor básico del primer parámetro se establece una medida de la diversidad genética de los individuos, ya que según va avanzando el proceso evolutivo, si este es excesivo, la población tenderá a homogeneizarse en torno al óptimo sin que ello llegue a proporcionar mejoras significativas. Desde el punto de vista del número de individuos es más difícil establecer una medida. Como referencia se establece una medida del porcentaje del tamaño del espacio de búsqueda.

Adicionalmente, para verificar el funcionamiento del entorno con el cálculo de la

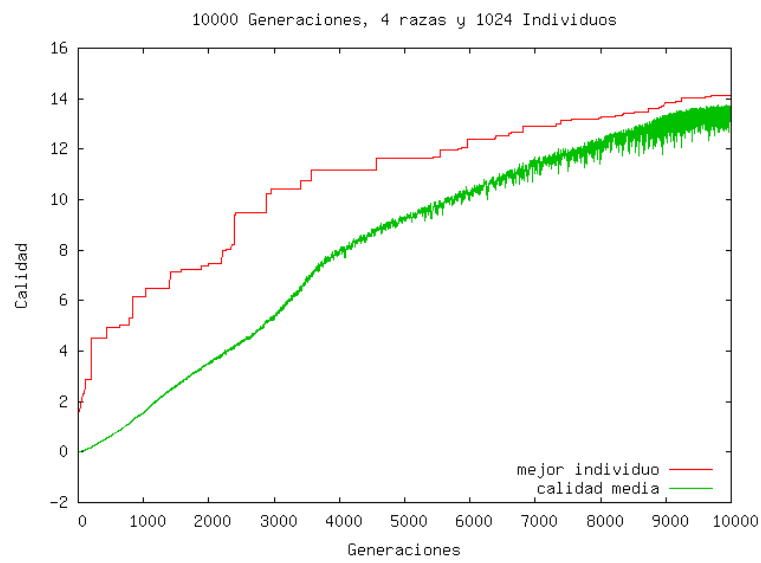


Figura 3.17: Calidad media y del mejor individuo para una población

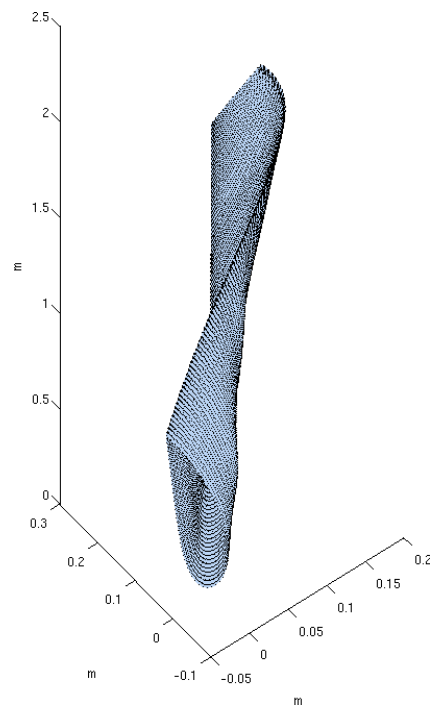


Figura 3.18: Representación tridimensional de la mejor pala encontrada

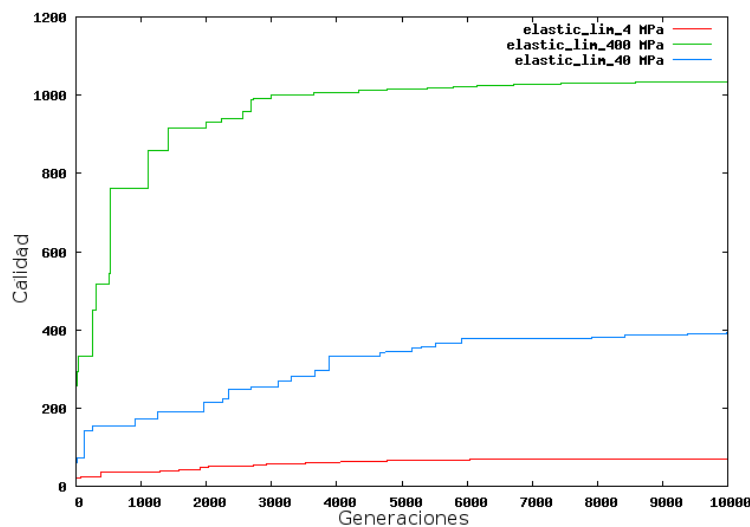


Figura 3.19: Evolución de la calidad para varios materiales

resistencia de materiales, figura 3.19, se han realizado pruebas con distintos materiales para verificar la influencia del uso de distintos materiales en el diseño del aerogenerador. Debido a la introducción del estudio estructural en el cálculo, se limitan los espesores mínimos así como las cuerdas máximas especialmente en los extremos de las palas, donde se puede generar el mayor par. De este modo, el uso de materiales de mayor límite elástico posibilita el uso de palas con una mayor cuerda en sus extremos generando fuerzas más grandes y, por tanto, un mayor par.

3.6. Conclusiones sobre el proceso de búsqueda

Los problemas de diseño aerodinámicos se caracterizan por una alta no linealidad y no tener un único óptimo claramente definido. Es por esto que, para la localización del óptimo, se empleen métodos que no sólo realicen una exploración eficiente del espacio de búsqueda sino que realicen una explotación eficaz de los resultados previos.

Los algoritmos macroevolutivos se presentan como una buena alternativa para la tarea de búsqueda en este tipo de problemas. Dentro de las ventajas de este método

pueden destacarse:

- El bajo número de parámetros que regulan el funcionamiento del algoritmo y la sencilla interpretación de los mismos. El proceso de optimización se regula mediante cinco parámetros:
 - **Número de individuos.** Es el principal parámetro del proceso de diseño, determina el número de diferentes alternativas consideradas en cada iteración el proceso evolutivo. Si bien sólo se evalúan las nuevas alternativas, es uno de elementos que determinan el coste computacional de desarrollo del diseño. El número de individuos determina el tamaño que en cada paso de tiempo se tiene del espacio de búsqueda.
 - **Número de generaciones.** El otro elemento que fija el coste computacional es el número de iteraciones en el proceso evolutivo.
 - **Número de razas.** El número de razas implica el número de poblaciones independientes que evolucionan separadamente, la única diferencia respecto a la realización de pruebas separadas es que periódicamente se lleva a cabo una migración de las mejores alternativas encontradas en cada una de las razas hacia los demás.
 - **Parámetro ρ .** Cuando se generan nuevos individuos a partir de los existentes, se obtienen como una combinación lineal de éstos regida por este valor. Mediante este valor se regula lo diferentes que son las nuevas alternativas de las soluciones iniciales.
 - **Parámetro τ .** El parámetro τ es el que controla el proceso evolutivo, y según como varíe con las generaciones determina la importancia de los procesos de exploración y explotación de los resultados. La definición habitual de este parámetro se realiza de tal forma que su valor vaya disminuyendo con el avance de las generaciones, aumentando progresivamente la explotación de los resultados. Es la intensidad con la que crece la explotación de los resultados lo que será necesario ajustar en cada problema para que, garantizando la correcta exploración del dominio de búsqueda, permita localizar el óptimo de la función de calidad definida.

- La estructura del algoritmo permite una fácil paralelización del mismo, lo que en el caso de problemas de evaluaciones de alto coste computacional, tales como los presentados, permite distribuir el proceso de cálculo, incluso en sistemas heterogéneos, reduciendo el tiempo efectivo de cálculo del problema de diseño.

Debido a la versatilidad del procedimiento, alcanzando buenos resultados en la localización de óptimos en un amplio abanico de topologías de funciones de calidad y a la facilidad de configuración del mismo se ha optado por los algoritmos macroevolutivos como el algoritmo de referencia para el entorno. De todas formas es necesario indicar que el entorno de diseño no se restringe a este algoritmo, sino que se ha diseñado para poder utilizar cualquier otro, simplemente debido a la versatilidad del mismo se ha optado como base para los problemas analizados.

Capítulo 4

Simulador numérico

El capítulo anterior se ha centrado en el desarrollo de los procedimientos de búsqueda de la mejor alternativa. Sin embargo los simuladores utilizados en las pruebas anteriores utilizan modelos muy simplificados del problema aerodinámico. Para poder aplicarse a problemas genéricos de diseño aerodinámico, el proceso de diseño ha de poder contemplar simuladores mas complejos que permitan evaluar modelos mas realistas del medio fluido y del objeto a analizar.

Si bien este trabajo no tiene por objetivo el desarrollo de un simulador fluido-dinámico, para poder realizar una correcta integración de los distintos módulos del sistema y mejorar el rendimiento del proceso de cálculo, es necesario estudiar el funcionamiento del simulador. En este estudio será la base para el desarrollo de herramientas, tanto en el caso del preprocesado como en el de los procesos de resolución y postprocesado, que servirán de apoyo a las distintas etapas del proceso de diseño. Por este motivo será necesario abordar las distintas dificultades que presenta el uso de estos simuladores, desde el proceso de generación de la malla hasta los modelos numéricos utilizados.

Por lo tanto, como queremos integrar y automatizar adecuadamente la simulación dentro del proceso de diseño es necesario analizar sus características y determinar las dificultades a solventar. El principal método utilizado en la simulación en mecánica de fluidos es el método de volúmenes finitos, y es en este método donde se centrará el estudio. Por ello, a continuación se presentan las características de este método y su

aplicación a la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes.

Con el objetivo de conseguir este objetivo el capítulo se ha estructurado en seis bloques. En el primer bloque se analizará el método de volúmenes finitos y las implicaciones de su uso en un entorno de diseño automático. En un segundo bloque se aborda la aplicación de un simulador basado en el método de volúmenes finitos a la resolución de un problema de ingeniería, el diseño óptimo de timones. Una vez analizada la viabilidad del uso de estos simuladores, se estudiará una de las fases más críticas del proceso de simulación, el mallado. Así tras proponer una alternativa a este proceso y probar su aplicabilidad mediante su aplicación al diseño de contracciones, se aplicará el procedimiento propuesto a un problema de gran complejidad. Por este motivo, en el último bloque, se realizará el diseño óptimo de la carena que constituye uno de los problemas de mayor complejidad computacional en el campo de la ingeniería naval.

4.1. Método de volúmenes finitos

El método de volúmenes finitos es una técnica de discretización de ecuaciones en derivadas parciales que permite resolverlas numéricamente incluso en regiones con geometrías muy complejas. Para ello se subdivide el dominio del modelo en volúmenes de control (en nuestro caso el volumen de control será construido a partir de mallas de tetraedros), se asigna un valor de la magnitud incógnita a cada uno de ellos y se escriben ecuaciones algebraicas que traducen aproximadamente a ecuaciones continuas del modelo.

Una de las ventajas de los métodos de volúmenes finitos es que, al hacer uso de una discretización directa de la forma integral de las leyes de conservación, se pueden garantizar las propiedades de conservación de masa, momento y energía en el problema discreto [79].

Comenzaremos dando unas ideas básicas del principio del método para una ecuación modelo. Siguiendo a [80], consideremos la siguiente ecuación de conservación:

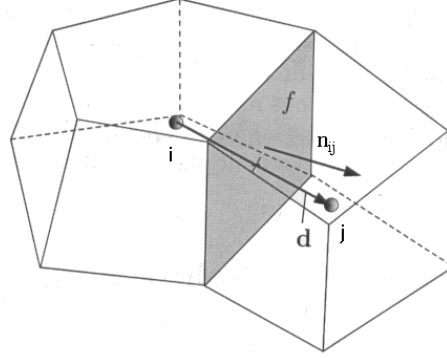


Figura 4.1: Volúmenes de control 3D

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathcal{F}(\mathbf{u}) = 0 \text{ en } \Omega \times [0, T] \quad (4.1)$$

donde Ω es un abierto de \mathbb{R}^n y las funciones

$$\mathbf{u} : \Omega \times [0, T] \longrightarrow \mathbb{R}^n \text{ y } \mathcal{F} : \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n \quad (4.2)$$

son suficientemente regulares. Integrando la ecuación (4.1) en el volumen de control Ω_i

$$\int_{\Omega_i} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathcal{F}(\mathbf{u}) \right) dV = 0, \quad (4.3)$$

aplicando el teorema de Gauss resulta

$$\int_{\Omega_i} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} dV + \int_{\partial \Omega_i} \mathcal{F}(\mathbf{u}) \mathbf{n}_i ds = 0, \quad (4.4)$$

siendo

$$\partial \Omega_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} \Gamma_j^i \quad (4.5)$$

con m_i el número de caras que componen la frontera de Ω_i y Γ_j^i la frontera común a las celdas Ω_i y Ω_j . Puede obtenerse, por tanto,

$$\int_{\Omega_i} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} dV + \sum_{j=1}^{m_i} \int_{\Gamma_j^i} \mathcal{F}(\mathbf{u}) \mathbf{n}_{ij} ds = 0 \quad (4.6)$$

donde \mathbf{n}_{ij} denota la normal a la cara Γ_j^i dirigida hacia el exterior de Ω_i .

Definiendo $\mathbf{u}_i(t)$ como

$$\mathbf{u}^i(t) = \frac{1}{|\Omega_i|} \int_{\Omega_i} \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) dV \quad (4.7)$$

en donde $|\Omega_i|$ es la medida de la celda Ω_i y puesto que ésta no cambia con el tiempo, (4.6) se puede escribir de la forma

$$|\Omega_i| \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_i} \mathbf{u} dV + \sum_{j=1}^{m_i} \int_{\Gamma_j^i} \mathcal{F}(\mathbf{u}) \mathbf{n}_{ij} ds = 0, \quad (4.8)$$

con lo que, introduciendo (4.7), se obtiene

$$|\Omega_i| \frac{\partial \mathbf{u}^i}{\partial t} + \sum_{j=1}^{m_i} \int_{\Gamma_j^i} \mathcal{F}(\mathbf{u}) \mathbf{n}_{ij} ds = 0. \quad (4.9)$$

Falta por discretizar el término del flujo en la frontera. Numerosos esquemas de aproximación de ese término están descritos en la bibliografía [80] se realiza una detallada descripción con aplicaciones de los más utilizados en los últimos años). De manera general buscaremos un flujo numérico que en cada cara de la frontera, Γ_j^i , sea una aproximación del flujo físico, es decir,

$$\Phi(\mathbf{u}^i, \mathbf{u}^j; \mathbf{n}_{ij}) \simeq \mathcal{F}(\mathbf{u}) \mathbf{n}_{ij}, \quad (4.10)$$

construida con los valores \mathbf{u}^i , \mathbf{u}^j y \mathbf{n}_{ij} , y verificando las siguientes propiedades:

- consistencia

$$\Phi(\mathbf{u}, \mathbf{u}; \mathbf{n}) = \mathcal{F}(\mathbf{u}) \mathbf{n} \quad (4.11)$$

- conservación (en ausencia de términos fuente)

$$\Phi(\mathbf{u}^i, \mathbf{u}^j; \mathbf{n}_{ij}) = -\Phi(\mathbf{u}^j, \mathbf{u}^i; -\mathbf{n}_{ij}) \quad (4.12)$$

Finalmente tendremos una expresión en la que intervendrán solamente los valores promedio en la celda Ω_i y otros elementos relacionados con las características geométricas de las mallas

$$|\Omega_i| \frac{\partial \mathbf{u}^i}{\partial t} + \sum_{j=1}^{m_i} |\Gamma_j^i| \Phi(\mathbf{u}^i, \mathbf{u}^j; \mathbf{n}_{ij}) = 0. \quad (4.13)$$

Como ya se ha dicho, en la bibliografía, [81], se proponen diferentes expresiones para $\Phi_{ij} = \Phi(\mathbf{u}^i, \mathbf{u}^j; \mathbf{n}_{ij})$. En nuestro caso se ha empleado una media ponderada de

- una aproximación centrada (CD),

$$\Phi_{ij}^{CD} = \alpha_{ij} \mathcal{F}(\mathbf{u}^j) \mathbf{n}_{ij} + (1 - \alpha_{ij}) \mathcal{F}(\mathbf{u}^i) \mathbf{n}_{ij} \quad (4.14)$$

con $\alpha_{ij} = \frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{ij}\|}{\|\mathbf{d}_j\|}$ siendo \mathbf{x}_{ij} el baricentro de la cara Γ_j^i y $\mathbf{d}_j = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i$,

- y una aproximación descentrada (*upwind*) (UD), en la que el valor Φ_{ij} se calcula atendiendo a la dirección del flujo,

$$\Phi_{ij}^{UD} = \begin{cases} \mathcal{F}(\mathbf{u}^i) \mathbf{n}_{ij} & \text{si } \mathbf{u}^i \cdot \mathbf{n}_{ij} > 0 \\ \mathcal{F}(\mathbf{u}^j) \mathbf{n}_{ij} & \text{si } \mathbf{u}^i \cdot \mathbf{n}_{ij} < 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

y que también se puede escribir como

$$\Phi_{ij}^{UD} = \mathcal{F}(\mathbf{u}^i) \mathbf{n}_{ij} \frac{(\mathbf{u}^i \cdot \mathbf{n}_{ij})_+}{|\mathbf{u}^i \cdot \mathbf{n}_{ij}|} + \mathcal{F}(\mathbf{u}^j) \mathbf{n}_{ij} \frac{(-\mathbf{u}^i \cdot \mathbf{n}_{ij})_+}{|\mathbf{u}^i \cdot \mathbf{n}_{ij}|} \quad (4.16)$$

donde $t_+ = \max\{t, 0\}$.

Dado un parámetro $\eta \in [0, 1]$ se tomará como flujo numérico la media ponderada:

$$\Phi_{ij} = (1 - \eta)(\Phi_{ij})^{UD} + \eta(\Phi_{ij})^{CD}. \quad (4.17)$$

4.1.1. Formulación conservativa de las ecuaciones de Navier-Stokes

A continuación se realizará una formulación de las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles y estacionarias sin fuerzas exteriores, tomando la presión como dato, que encaje con la ecuación modelo (4.1).

Consideremos el sistema:

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \rho \mathbf{u}) - \mu \nabla \cdot (\nabla \mathbf{u}) = -\nabla p, \quad (4.18)$$

agrupando términos se obtiene que

$$\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \rho \mathbf{u} - \mu \nabla \mathbf{u}) = -\nabla \cdot p \mathbf{I}. \quad (4.19)$$

Definiendo

$$\mathcal{F}(\mathbf{u}) = \mathbf{u} \otimes \rho \mathbf{u} - \mu \nabla \mathbf{u}, \quad (4.20)$$

el sistema (4.18) se puede escribir

$$\nabla \cdot \mathcal{F}(\mathbf{u}) = -\nabla \cdot p \mathbf{I}. \quad (4.21)$$

4.2. Resolución numérica

4.2.1. Cálculo de la velocidad

Aún tomando la presión como dato, las ecuaciones de Navier-Stokes (4.21) presentan dos dificultades: la primera es el carácter no lineal del término $\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \rho \mathbf{u})$ y la segunda es que al discretizar espacialmente con técnicas de volúmenes finitos, las derivadas de las soluciones del problema discreto no pertenecen a los espacios funcionales usuales.

Por lo que se refiere al segundo problema, el cálculo del gradiente de una magnitud vectorial Θ definida constante por elemento se realiza mediante una aproximación de mínimos cuadrados [82]. De este modo se obtiene

$$(\nabla \Theta)^i = \sum_{j=1}^{m_i} \frac{1}{\|\mathbf{d}_j\|^2} (G^i)^{-1} (\Theta^j - \Theta^i) \otimes \mathbf{d}_j \quad (4.22)$$

donde G^i es el tensor definido para cada celda

$$G^i = \sum_{j=1}^{m_i} \frac{1}{\|\mathbf{d}_j\|^2} \mathbf{d}_j \otimes \mathbf{d}_j \quad (4.23)$$

Notemos que G_i es una constante que sólo depende de la malla y que (4.22) es una relación lineal para los valores de Θ .

La primera dificultad, esto es, la resolución del sistema no lineal $\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \rho \mathbf{u})$ se obviará mediante el uso de una técnica de punto fijo, más concretamente se emplea el siguiente algoritmo:

ALG. 1

1. Dado un campo de velocidades inicial \mathbf{u}^0 ,
2. para $n=1,2, \dots$
 - a) se resuelve el problema lineal no simétrico con las condiciones de contorno adecuadas

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}^{n+1} \otimes \rho \mathbf{u}^n) - \mu \Delta \mathbf{u}^{n+1} = -\nabla p. \quad (4.24)$$

b) Test de parada: si $\|\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n\| > \varepsilon$ vuelta a (2.1), caso contrario FIN.

Este procedimiento reduce la no linealidad cuadrática a sucesivas resoluciones de problemas lineales.

4.2.1.1. Observación

Integrando (4.24) en el volumen de control se obtiene una formulación conservativa:

$$\int_{\Omega_i} \nabla \cdot (\mathbf{u}^{n+1} \otimes \rho \mathbf{u}^n) dV - \int_{\Omega_i} \mu \Delta \mathbf{u}^{n+1} dV = - \int_{\Omega_i} \nabla p dV. \quad (4.25)$$

Aplicando la condición de incompresibilidad (2.15) y el teorema de Gauss resulta:

$$\int_{\partial\Omega_i} (\mathbf{u}^{n+1} \otimes \rho \mathbf{u}^n) \mathbf{n}_{ij} ds - \int_{\partial\Omega_i} \mu \nabla \mathbf{u}^{n+1} \mathbf{n} ds = - \int_{\partial\Omega_i} p \mathbf{n} ds, \quad (4.26)$$

o bien

$$\int_{\partial\Omega_i} (\mathbf{u}^n \cdot \mathbf{n}_{ij}) \rho \mathbf{u}^{n+1} ds - \int_{\partial\Omega_i} \mu \nabla \mathbf{u}^{n+1} \mathbf{n} ds = - \int_{\partial\Omega_i} p \mathbf{n} ds. \quad (4.27)$$

Definiendo el flujo físico de la forma

$$\mathcal{F}^n(\mathbf{u}) = \mathbf{u} \otimes \rho \mathbf{u}^n - \mu \nabla \mathbf{u}, \quad (4.28)$$

las formulaciones centrada (4.14) y upwind (4.15) del flujo vienen dadas por:

$$\Phi_{kl}^{CD} = \left[\alpha_{kl} \left(\mathbf{u}^l \otimes \rho \mathbf{u}^{ln} - \mu \nabla \mathbf{u}^l \right) + (1 - \alpha_{kl}) \left(\mathbf{u}^k \otimes \rho \mathbf{u}^{kn} - \mu \nabla \mathbf{u}^k \right) \right] \mathbf{n}_{kl} \quad (4.29)$$

$$\alpha_{kl} = \frac{\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{kl}\|}{\|\mathbf{d}_l\|}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{kl}^{UD} = & \left[\frac{(-\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{n}_{kl})_+}{|\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{n}_{kl}|} \left(\mathbf{u}^l \otimes \rho \mathbf{u}^{ln} - \mu \nabla \mathbf{u}^l \right) + \right. \\ & \left. \frac{(\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{n}_{kl})_+}{|\mathbf{u}_k \cdot \mathbf{n}_{kl}|} \left(\mathbf{u}^k \otimes \rho \mathbf{u}^{kn} - \mu \nabla \mathbf{u}^k \right) \right] \mathbf{n}_{kl}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Se tomará como flujo numérico la cara común a las celdas Ω_k y Ω_l

$$\Phi_{kl} = (1 - \eta)(\Phi_{kl})^{UD} + \eta(\Phi_{kl})^{CD}, \quad \eta \in [0, 1]. \quad (4.31)$$

4.2.2. Cálculo de la presión

Para el ajuste de la presión se ha optado por un algoritmo PISO (Pressure Implicit Splitting of Operators) propuesto por[83] que también permite su empleo en procesos dependientes del tiempo. Tomando la divergencia de la ecuación del momento (2.16) se obtiene

$$-\Delta p = \nabla \cdot \rho (\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u})) - \nabla \cdot \mu \Delta \mathbf{u}, \quad (4.32)$$

teniendo en cuenta que los operadores divergencia y laplaciano conmutan y la ecuación de la continuidad,

$$\mu \nabla \cdot \Delta \mathbf{u} = \mu \Delta (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \mathbf{0}, \quad (4.33)$$

finalmente resulta

$$-\Delta p = \rho \nabla \cdot (\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u})). \quad (4.34)$$

De este modo, conocida la velocidad, se puede calcular la presión resolviendo una ecuación de Poisson. Esto sugiere la utilización de un método de punto fijo. El algoritmo sería el siguiente:

ALG. 2

1. Dada p^0 , presión inicial,
2. para $m=1,2 \dots$
 - a) Cálculo de \mathbf{u}^{m+1} como solución del ALG. 1.

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}^{m+1} \otimes \mathbf{u}^{m+1}) - \mu \Delta \mathbf{u}^{m+1} = -\nabla p^m \quad (4.35)$$

- b) Cálculo de

$$S^{m+1} = \rho \nabla \cdot (\nabla \cdot (\mathbf{u}^{m+1} \otimes \mathbf{u}^{m+1})) \quad (4.36)$$

- c) Cálculo de la nueva presión

$$-\Delta p^{m+1} = S^{m+1} \quad (4.37)$$

- d) Test de parada: si $|p^{m+1} - p^m| > \epsilon_1$ y $\|\mathbf{u}^{m+1} - \mathbf{u}^m\| > \epsilon_2$ vuelta a 2, en caso contrario FIN.

4.3. Implementación - La biblioteca OpenFOAM

Para realizar el trabajo de programación, salvo en los casos que se indica expresamente, se ha optado por el uso de una biblioteca de módulos programados en C++ desarrollados siguiendo licencias GPL y con el código abierto OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) ¹. Esta biblioteca permite discretizar y resolver sistemas de ecuaciones en derivadas parciales que modelan problemas de ingeniería: ecuaciones de Navier-Stokes, de Maxwell... Además incorpora utilidades de pre y postprocesado para la transformación de información, obtención de magnitudes derivadas y su visualización.

Como los orígenes de OpenFOAM están vinculados a la mecánica de fluidos, discretiza las ecuaciones usando el método de volúmenes finitos. Está previsto para trabajar sobre mallas no estructuradas tridimensionales con elementos tetraédricos, hexaédricos y pentaédricos. Además, puede transformar la información y resolver sencillos problemas mediante elementos finitos. Esto resulta especialmente útil en algunos casos de sistemas de ecuaciones acopladas. Otra ventaja a la hora de resolver problemas de gran tamaño es que incorpora un procedimiento de paralelización automática de los algoritmos, que no necesita la intervención directa del usuario.

Al tratarse de un código completamente abierto permite la incorporación de nuevos módulos, lo que proporciona un entorno de trabajo flexible y cómodo que puede ser utilizado tanto por el usuario no iniciado en los métodos numéricos (que se limitaría a utilizar los programas de la biblioteca) como por el experto (que podría incorporar sus propios códigos de discretización, resolución y postprocesado).

4.3.1. Estructura básica de programación en OpenFOAM

La biblioteca OpenFOAM proporciona las herramientas necesarias para la discretización y resolución de ecuaciones de derivadas parciales. En esta sección se resume

¹<http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>

la secuencia modelo de un procedimiento general de programación.

1. **Inicialización del problema.** Se crea el objeto *problema* y se leen los parámetros generales, por ejemplo la opción de paralelización y el número de CPU, la posición en el árbol de archivos y los nombres de los ficheros, ...

```
Foam::Time problema(runtime , rootPath (),args());
```

2. **Lectura o creación de la malla.** OpenFOAM puede crear mallas y también leerlas de ficheros generados por otros preprocesadores: Gambit, Ideas, Grid, Ansys... El resultado final tiene que ser una malla de elementos y caras, distinguiendo para estas últimas entre interiores y frontera. Además existe un módulo que permite obtener la información necesaria para una malla de elementos finitos formada por tetraedros a partir de una de volúmenes finitos con elementos de geometría arbitraria.
3. **Inicialización de las variables y constantes.** Se definen y generan las distintas variables que intervienen en el modelo. Como norma general el tipo de variable se define por dos parámetros fundamentales. El primero indica si la variable está asociada al elemento, *vol*, o a sus vértices, *point*, aunque se podrían definir variables sobre puntos tales como baricentros, centros de cara. El segundo define el tipo de variable: escalar, *Scalar*, vectorial, *Vector*, o tensorial, *Tensor*. Adicionalmente, en el caso de variables asociadas a mallas de elementos finitos se introduce un *tet* en el inicio de su definición.

En OpenFOAM existen diversas alternativas para discretizar los operadores anteriores y así como para los métodos de interpolación. Para seleccionarlos, en un archivo de configuración, se indica el método deseado para cada uno de los términos.

4. **Resolución del sistema.** En el caso de problemas no lineales OpenFOAM sólo tiene previsto el método de punto fijo.
5. **Postprocesado de los datos.** Entre otros, se disponen de módulos que permiten

- obtener fuerzas sobre las fronteras por integración de la presión,
- para una magnitud calculada determinar su gradiente,
- calcular el flujo a través de una superficie.

La visualización de los resultados del cálculo y del postproceso se realizan conjuntamente con módulos de OpenFOAM y el Paraview².

4.4. Optimización de hidrodinámica de timones

El siguiente paso en el proceso de aplicación del entorno de diseño desarrollado, es la incorporación de las técnicas de simulación numérica mediante el método de volúmenes finitos. Así se ha optado por su aplicación al diseño hidrodinámico de timones donde se hará uso de simuladores hidrodinámicos aplicados al caso tridimensional. Aunque se trata de un perfil tridimensional similar a los aerogeneradores estudiados anteriormente, el simulador empleado es totalmente distinto ya que se utilizará una resolución tridimensional del flujo, en este caso se considera un fluido incompresible y un flujo laminar, mediante un simulador basado en técnicas de volúmenes finitos. Sin embargo, al presentar una geometría de sencilla generación, las tareas de preprocesado relativas al mallado del dominio no constituyen una dificultad importante para abordar este problema.

En cuanto al problema en sí, en el sistema de propulsión y mando de un buque uno de los componentes es el timón, encargado de conseguir la maniobrabilidad de la embarcación. Este componente está formado conceptualmente por una única pala, pero en los últimos años la tendencia del diseño se está enfocando hacia una gama de timones de grandes prestaciones que incorporan unos elementos articulados denominados “flaps”. Este tipo de timones tienen la capacidad de aumentar la maniobrabilidad de la embarcación. El objetivo es modificar dinámicamente el perfil del timón consiguiendo una mayor fuerza de sustentación sin incremento de la resistencia al avance del buque. Esto implica que se aumenta la maniobrabilidad del buque sin modificar los

²<http://www.paraview.org/>

requerimientos de potencia, mejorando notablemente las maniobras de acceso a puertos o zonas sinuosas donde la capacidad de giro es importante, y también aumentado la seguridad al disminuir el radio de giro ante un cambio de rumbo. El objetivo del ensayo que se plantea en este trabajo es desarrollar un timón que aporte una mejor maniobrabilidad y menor resistencia al avance.

Este estudio no sólo se ha centrado en el análisis de las distintas alternativas, si no que se han analizado los requerimientos de maniobrabilidad y reglamentarios del mismo. Las necesidades de maniobrabilidad son especialmente relevantes en los buques pesqueros y en concreto en los cerqueros, ya que además de tener que perseguir los bancos de pescado, en algunos casos han de describir el cerco de la maniobra durante el largado del aparejo, y contrarrestar el tiro y ayudar a la estabilización del buque durante el virado de las redes, por lo que a menudo las necesidades de maniobrabilidad de estos barcos frente a otros son superiores.

Como modelo inicial para el proceso de optimización se ha partido de los resultados del estudio analítico previamente realizado en el grupo de investigación[84] en el que se ha desarrollado un método de definición de las características principales de un timón base para un buque atunero al cerco. Los resultados obtenidos en este trabajo previo y que utilizaremos como punto de partida en el actual pueden resumirse en los siguientes valores:

Cuerda	Puntal	Esbeltez	Espesor	Compensación	Reynolds
3 m	5,7 m	1,9	0,9	18 %	$3 \cdot 10^7$

En cuanto a la posición del timón se ha pretendido analizar las condiciones hidrodinámicas que parecen más convenientes para optimizar el diseño del timón, prestándole la debida atención al efecto del régimen del flujo incidente y al efecto de cavitación.

La influencia del casco (influencia de las formas de popa en la efectividad en el ángulo de ataque al timón y en la velocidad del fluido) y el propulsor (variación de la velocidad del flujo incidente) sobre estas características hidrodinámicas determina en gran medida la posición relativa del timón que intentamos determinar, teniendo en cuenta la influencia no sólo de los valores numéricos obtenidos sino también de los resultados experimentales realizados por investigadores anteriores. Sin embargo los

valores aquí alcanzados han de ser adaptados a un barco en concreto con sus formas de popa determinadas y su propulsor.

4.4.1. Simulador numérico

Los resultados del proceso de diseño dependerán directamente del simulador utilizado para el desarrollo del mismo. Sin embargo, es necesario considerar el esfuerzo computacional que requiere el proceso de cálculo, de tal modo que será necesario ponderar las mejoras introducidas respecto al coste computacional del mismo, y por lo tanto se realizarán una serie de simplificaciones que se indican a continuación:

- El fluido es incompresible.
- No se consideran procesos disipativos turbulentos.

La consideración de incompresibilidad del fluido se puede considerar válida en todo el análisis, ya que en las únicas regiones que podría no considerarse válida sería en aquellas en las que se produzca cavitación. Estos procesos, en el caso de producirse, ocurrirían en primer lugar en la hélice. Es por esto que, al considerar que la hélice se ha diseñado para evitar estos fenómenos, no se producirá cavitación en los ensayos realizados.

Según lo expuesto en el apartado 2.3, se hace uso aquí de las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes. Para introducir la disipación producida por la turbulencia, se suele introducir una viscosidad turbulenta, que se considera constante en la celda. Esto supone introducir dos ecuaciones adicionales en el sistema de ecuaciones existentes y una o dos variables más en el sistema. Así se incrementa considerablemente el coste computacional de resolución del sistema, por ello, al igual que en el caso anterior será necesario evaluar en qué medida afecta a resultados y en cuánto se incrementa el coste computacional.

Debido al menor coste computacional de este simulador se han desarrollado las pruebas para obtener dos parámetros críticos en la determinación del coste computacional de la simulación. Este depende directamente del número de celdas, por lo que

en primer lugar será necesario determinar el valor mínimo del mismo que permitan resultados significativos. Este dimensionamiento se realiza mediante la selección de dos parámetros: el volumen y el tamaño de los elementos de la malla. La primera se ha realizado mediante el análisis de la posición de las fronteras evitando que interfiera con las estructuras generadas en las proximidades del timón. Para la segunda se ha optado por dotar de una resolución suficiente a la discretización del timón de forma que pueda recoger las modificaciones en el mismo durante el proceso de diseño.

4.4.2. Generación de la malla

Las características del problema considerado, han llevado a la utilización de una malla estructurada para la discretización del dominio fluido. Esta se genera dividiendo el dominio mediante divisiones en cada una de sus dimensiones principales. Resulta un proceso de generación de la malla sencillo y de muy bajo coste computacional. Además, al poderse controlar la distribución del tamaño de las celdas, mediante unos pocos parámetros puede orientarse en la dirección principal del flujo y refinarse en zonas específicas. Esto permite capturar fenómenos producidos en regiones como la capa límite optimizando el número de celdas, ya que se puede disminuir el tamaño únicamente en una dirección sin reducir las restantes. Sin embargo, este método no es aplicable a formas complejas ya que ha de poderse establecer una función de transformación sobre el dominio que permita establecer tres direcciones principales.

En esta aproximación mallas se conjuga un bajo coste computacional y una buena calidad de las mallas generadas lo que lleva a que esta estrategia de generación de alternativas sea la prioritaria a utilizar. Como el timón puede modelizarse como un perfil extruido y por lo tanto no es una forma compleja, hace de este método el más adecuado para este problema.

Puesto que el dominio de simulación es de un tamaño considerablemente mayor que el tamaño del timón, el dominio fluido se ha estructurado en dos bloques:

- **Bloque timón:** contiene al timón y se construye en cada paso de tiempo y para cada timón y para cada ángulo de giro y posición de los flaps.

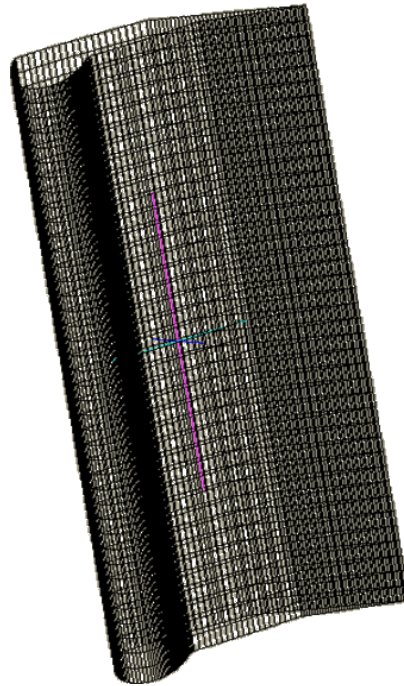


Figura 4.2: *Malla del timón*

- **Bloque fijo:** en las regiones más alejadas se ha constituido un bloque fijo que no se modifica.

4.4.3. Caracterización del timón

El experimento que se aborda busca desarrollar un timón para buques de tamaño medio de bajo coste y de altas prestaciones. Adicionalmente se ha buscado definir una tipología de timón que se diferencie claramente de sistemas existentes en la actualidad para este tipo de buques.

Es por esto que se ha optado por un timón que se caracterice por dos elementos fundamentales, en primer lugar el perfil del timón es constante y el timón diseñado tiene dos flaps o aletas, una en proa y otra en popa.

Para la definición del perfil se ha optado por partir de una definición del mismo a través de una formulación basada en los perfiles NACA simétricos en los que sus

coeficientes característicos se modifican durante el proceso de optimización, de forma que resulta:

$$\frac{y}{c} = t \left(C_1 \sqrt{\frac{x}{c}} + C_2 \frac{x}{c} + C_3 \left(\frac{x}{c} \right)^2 + C_4 \left(\frac{x}{c} \right)^3 + C_5 \left(\frac{x}{c} \right)^4 \right) \quad (4.38)$$

Siendo:

$$C_1 = 0,2969\lambda_1, \text{ con } \lambda_1 : [0,9, 1,1]$$

$$C_2 = -0,1260\lambda_2, \text{ con } \lambda_2 : [0,9, 1,1]$$

$$C_3 = -0,3516\lambda_3, \text{ con } \lambda_3 : [0,9, 1,1]$$

$$C_4 = 0,2843\lambda_4, \text{ con } \lambda_4 : [0,9, 1,1]$$

$$C_5 = 1 - (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)$$

Para definir los parámetros de forma se ha partido del timón obtenido en el estudio analítico, con un puntal de de 5,7 metros. Los dos parámetros adicionales que se busca optimizar son la esbeltez del perfil, en la que se consideran fluctuaciones del 20 % en torno a la 1,9 que se ha calculo previamente, y un espesor del 30 % modificándose en un rango 15 %.

El siguiente parámetro define el grado de compensación del timón. Para la evaluación de este parámetro no sólo se ha considerado la posición del centro de presiones del timón a pequeños ángulos, si no que, ya que determina el centro de giro del timón, se considera su efecto sobre la desviación del flujo que proviene de la hélice.

Los últimos elementos para definir las características del timón son los relativos a los flaps. Es por ello que es necesario establecer los parámetros que definen, en primer lugar, la longitud de cada uno de los flaps. Para el control de los flaps se ha buscado que sea una relación lo más sencilla posible con el objeto de minimizar su coste constructivo. Es por ello que se ha buscado que su ángulo sea función del ángulo de la mecha del timón.

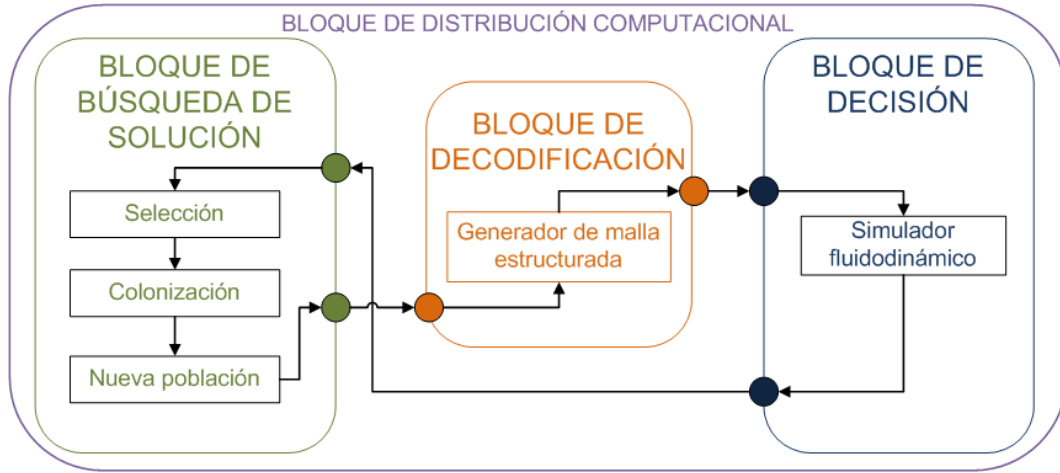


Figura 4.3: Configuración del entorno de diseño aplicado al timón

4.4.4. Resultados

Adicionalmente se ha evaluado la influencia de las diferentes funciones de calidad en el diseño del timón, ya que debido a su bajo coste computacional se han podido obtener resultados aceptables en tiempos breves de cómputo. Las funciones de calidad se han seleccionado como una ponderación del 90 % del par generado y un 10 % de la resistencia al avance. La evaluación del par generado se ha realizado mediante la siguiente función:

$$C_1 = \int_0^{35} \frac{F_n}{\frac{1}{2}A\rho v^2} d\theta \quad (4.39)$$

Siendo F_n la fuerza perpendicular al avance del buque, A el área del timón y v la velocidad del flujo proveniente de la hélice.

Las pruebas del sistema completo se han realizado en el cluster local del Grupo Integrado de Ingeniería utilizando 8 *AMD OpteronTM Quad – Core*, durante un total de 157 horas de cómputo. En esta prueba, se ha evaluado una población de 25 individuos con un total de 100 generaciones. Los resultados obtenidos pueden considerarse como una primera aproximación a la resolución del proceso final ya que se ha definido con la suficiente flexibilidad para poder adaptarse a nuevas definiciones de los criterios de calidad así como de requerimientos de sistemas de control de los flap y definición del perfil del timón. En la gráfica 4.4 se muestra la evolución del mejor individuo para el

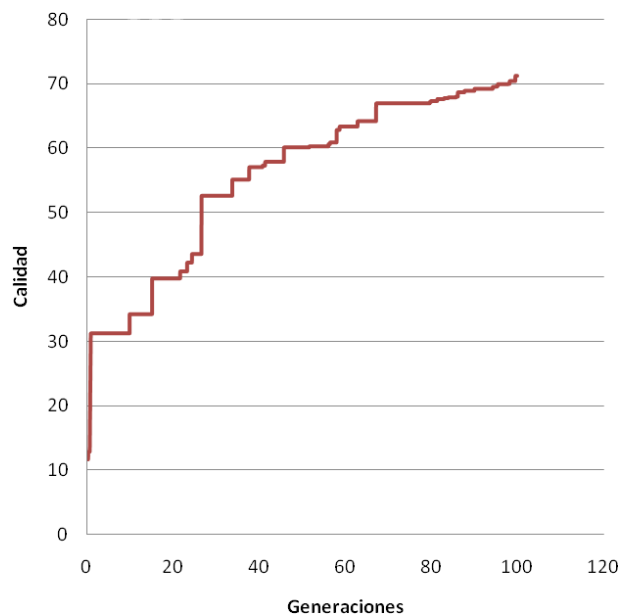


Figura 4.4: Evolución de la calidad del mejor individuo

objetivo de mayor par generado.

El mejor individuo, atendiendo al criterio del 90 % - 10 % ha obtenido una relación de aspecto de 0.503, 3.040 x 5.700 metros con una compensación del 38 %, el par torsor máximo se produce a 35°, con un valor de 342,7 kN·m.

La función de transferencia resultante ha sido:

- Para el flap de proa, $\beta_1 = -0,2$
- Para el flap de popa, $\beta_2 = 0,4$

El par torsor máximo se produce a 35° con un valor de 342,7 kN·m.

4.4.5. Conclusiones del experimento

Mediante el procedimiento descrito se ha logrado la optimización simultánea de la forma y el sistema de control del timón. De esta forma se han mejorado los resultados

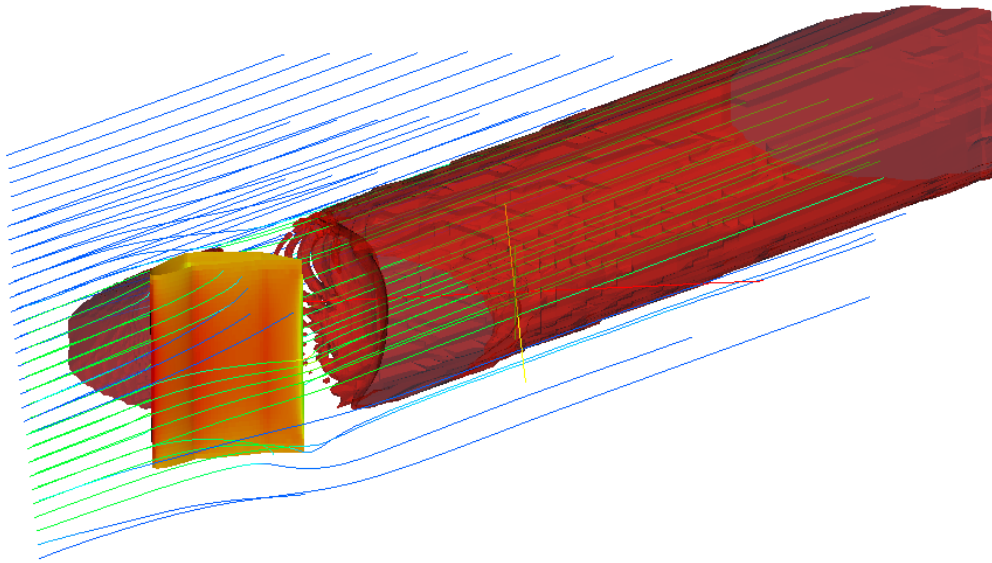


Figura 4.5: *Mejor configuración del timón a 35°*

en la función de calidad definida, en un 68,7 % respecto al modelo sin flaps que se ha utilizado como modelo de referencia inicial.

En este problema se han detectado dos necesidades adicionales que han de integrarse dentro del sistema para facilitar su aplicación a problemas de mayor complejidad. En primer lugar surge un problema para definir una función de calidad como la composición de otras con el fin de obtener un único objetivo. La dificultad de realizar adecuadamente esta ponderación nace al no estar totalmente determinada de origen, induciendo un proceso de prueba y error para establecer estos parámetros que no resulta adecuado para un sistema de diseño automático .

Por ejemplo, en el caso presentado, habría que contemplar como se modifica el diseño si se considera una relación del 85 % - 15 % y si este modelo sería mas o menos adecuado al buque objetivo. Es por ello que la alternativa mas adecuada con el objeto de posibilitar un diseño del timón de aplicación mas genérica sería la realización de la optimización mediante un planteamiento multiobjetivo, de tal modo que, una vez definido el abanico de las mejores opciones o, para ser más precisos, las soluciones no dominadas, se pueda escoger la que mejor se adapte a las necesidades del buque

concreto. Ésto ha llevado a que en la siguiente etapa de desarrollo del proceso de búsqueda del entorno de optimización se introduzcan estrategias multiobjetivo para abordar estos problemas.

Por otro lado, se ha visto que el uso de mallas estructuradas, si bien requieren un bajo coste computacional, dificulta o imposibilita la simulación de formas complejas. De esta forma, si se quiere introducir las formas del casco o elementos adicionales propios del timón, es necesario recurrir a otras estrategias de mallado que lo posibiliten. Este tema lo abordaremos en la siguiente sección planteando la utilización de mallas no estructuradas y de inmersión de frontera.

4.5. La generación de la malla

En las secciones anteriores se han analizado las implicaciones de introducir un simulador numérico en un sistema automático de diseño óptimo. Uno de los puntos que ha resultado crítico en este proceso ha resultado ser la generación de la malla. Por este motivo a continuación se estudiará las características del mismo y planteandose alternativas que permitan integrarlo eficientemente en el entorno de optimización. Así, tras definir la alternativa que se considere más adecuada se realizarán dos pruebas para verificar su funcionamiento: una más sencilla a modo de primera aproximación, buscando la optimización de una contracción, y otra de mayor complejidad, la optimización de las formas de carena.

La especial dificultad de la generación de la malla hace necesario que la optimización no pueda abordarse únicamente mediante dos etapas: búsqueda y decisión, sino que ha de contemplar una etapa adicional. De este modo el entorno de diseño estará constituido por tres bloques:

- Bloque de búsqueda.
- Bloque de decisión / simulador hidrodinámico
- Bloque de decodificación

Si bien los dos primeros bloques son comunes a todos los procesos de diseño y optimización, en el caso de los problemas fluidodinámicos surge la necesidad de un tercer módulo de decodificación. Esta necesidad viene dada por las características propias de los problemas abordados. ya que mientras que el módulo de búsqueda opera con la definición paramétrica de la alternativa, en el caso de los algoritmos evolutivos el cromosoma del individuo (genotipo), para la obtención de su calidad a través de sus características fluidodinámicas se requiere una discretización del dominio tridimensional, dominio del que la alternativa (fenotipo) suele constituir parte de la frontera.

Las características específicas de cada problema hacen que difícilmente pueda establecerse un proceso único para la reconstrucción tridimensional de cada una de las alternativas y la malla de volúmenes finitos que lleva asociada. Para abordar este proceso se han desarrollado tres estrategias diferenciadas:

- Creación de una nueva malla adecuada a la nueva configuración de la frontera.
- Modificación de una malla existente para adecuarse a la nueva forma de la frontera, dentro de este grupo se han diferenciado:
 - Métodos de desplazamiento de la frontera.
 - Métodos de inmersión de la frontera.

En este capítulo se abordan los métodos de generación de malla y desplazamiento de la frontera, el análisis de los métodos de inmersión de frontera se realiza en el siguiente capítulo junto con un ejemplo su aplicación. La finalidad de estos estudios es establecer unos criterios para determinar la adecuación de cada uno de ellos a los problemas analizados.

4.5.1. Definición y validez de la malla

El bloque de decodificación tiene por objetivo desarrollar una malla adecuada a la evaluación de cada alternativa ya que es un prerequisite fundamental para el éxito de un proceso de simulación numérica. Su calidad se evaluará en base a criterios topológicos y geométricos. Los primeros se refieren a la posición relativa de nodos y elementos

(conectividad) y los segundos a las coordenadas espaciales. Así será necesario analizar estos criterios cada vez que se modifique la malla para obtener resultados adecuados en las simulaciones.

Una malla bien definida debe verificar las siguientes restricciones sobre las características topológicas:

- Un punto sólo puede aparecer en una cara una vez.
- Una cara sólo puede aparecer en un elemento una vez.
- Una cara sólo puede pertenecer a dos elementos si es interior, o a uno si es frontera.
- Dos elementos no pueden compartir más de una cara.
- Considerando todas las caras de un elemento, y todas las aristas de estas caras, cada una de las aristas debe aparecer en dos y sólo dos caras.
- Considerando todas las caras de la frontera y todas las aristas de estas caras cada una de ellas debe aparecer en dos y sólo en dos caras de la frontera.

Todas estas condiciones garantizan que la conectividad es correcta en el dominio total, localmente por elemento y globalmente en la frontera.

Las comprobaciones geométricas se realizan para verificar que el volumen de las caras y que los elementos son estrictamente positivos, así como su convexidad y requerimientos de orientación. Estamos en el caso más sencillo para realizarlas ya que trabajamos con mallas de tetraedros.

Los criterios geométricos considerados son:

- Todas las caras y elementos deben ser convexos.
- Todos los elementos tienen que ser geoméricamente cerrados.
- La frontera tiene que ser geoméricamente cerrada.

- En todas las caras la orientación positiva se corresponde con la normal exterior al elemento, lo que implica que los puntos de una cara se dan en orden distinto dependiendo del elemento de que se trate.

Estas reglas formuladas para una malla tridimensional se aplicarán al caso bidimensional sustituyendo cara por arista y arista por punto.

Incluso mallas correctamente definidas según estos criterios pueden resultar inadecuadas para resolver numéricamente ciertos problemas físicos. Por lo tanto es deseable que se verifiquen ciertas condiciones sobre homogeneidad y regularidad en elementos próximos en lo que se refiere a volumen de elementos, área de caras y magnitud de ángulos.

4.5.2. Estrategia de desplazamiento de malla

En los problemas de diseño considerados, una de las variables de cada alternativa es la forma de la frontera. Por ello se han desarrollado métodos de deformación de mallas que permiten adaptar el proceso de discretización a las distintas configuraciones que el dominio puede adoptar. La principal dificultad estriba en modificar la geometría de la malla previniendo la aparición de elementos degenerados y preservando unos buenos parámetros de calidad de la misma. Estos problemas se acrecientan cuando la malla no es estructurada.

Algunas estrategias muy eficaces se basan en el refinamiento del mallado, lo que modifica el número de nodos y elementos y la conectividad de los mismos, por lo que resultan muy costosos. Por ello nos vamos a centrar en métodos que conserven el número de nodos y de elementos y la conectividad. Una de las técnicas más usuales es la resolución de un problema de elasticidad cuyo resultado va a ser el vector de los desplazamientos de los nodos de la malla. Distinguiremos dos familias: los basados en sistemas discretos de muelles contruidos sobre las aristas de la malla ([85], [86] y [87]) y los que emplean la resolución de un problema distribuido de elasticidad tridimensional (citaremos, por ejemplo, las propuestas en [88], [89] y [90]). Próximo a estos últimos pero con mucho menor coste computacional es la resolución de una ecuación del potencial. Todos estos procedimientos son aplicables a mallas de elemen-

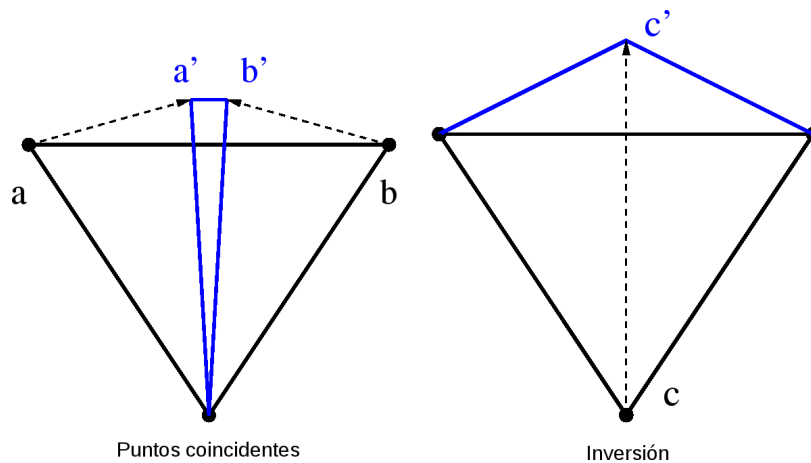


Figura 4.6: Ejemplo de situaciones degeneradas

tos o volúmenes finitos estructuradas o no. En estos tres últimos casos a los que nos hemos referido, el usuario puede controlar el proceso actuando sobre las constantes de elasticidad o de difusión, de manera que no se deteriore mucho la calidad de la malla.

4.5.2.1. Algoritmo de modificación del mallado

En el proceso de modificación de la malla las características topológicas descritas en la sección anterior deben conservarse, pudiéndose modificar sólo la posición de los nodos [91]. Un procedimiento robusto para transformar la malla debe preservar, en la medida de lo posible, la homogeneidad de la misma.

Las primeras soluciones a este problema estaban basadas en que el desplazamiento de nodos se fundamente en una analogía a un sistema de muelles. En ella los lados de la malla son reemplazados por muelles elásticos y el desplazamiento del nodo se obtiene mediante la resolución del sistema de cargas inducidas por el desplazamiento de la frontera. El sistema lineal de las ecuaciones de movimiento se obtiene del balance de fuerzas sobre todos los nodos.

A pesar de la validez del planteamiento, en su aplicación aparecen fallos en los nodos, especialmente en el caso de celdas poliédricas. Estos fallos están motivados por la precisión con la que trabaja el ordenador en la resolución del sistema de ecuaciones

lineales.

El fallo mas simple se produce cuando dos puntos, a y b , de un triángulo colapsan uno sobre el otro y el triángulo degenera en una línea. Este fallo está motivado por la analogía con muelles lineales ya que la fuerza resultante de colapsar un nodo sobre otro no genera una fuerza infinita sino un valor finito. Este fallo es fácilmente resoluble introduciendo una no linealidad, por ejemplo introduciendo un coeficiente dependiente de la longitud, empleando leyes de tipo exponencial o similar. Esto implica un incremento significativo en los requerimientos computacionales ya que se transforma un sistema de ecuaciones lineales en un problema no lineal que requiere un proceso iterativo para su resolución.

El segundo tipo principal de fallo es el giro del triángulo, figura 4.6. En este caso el triángulo degenera al posicionarse el punto c en el lado opuesto. En este caso, ningún elemento se comprime hasta reducirse a cero su dimensión y no puede solventarse mediante el procedimiento anterior. En este sentido Farhat y Degand[92], proponen una solución introduciendo muelles torsionales que controlan este fenómeno, aunque introducen nuevas ecuaciones para el equilibrio del par en todos los nodos. Debido a la necesidad de incorporar las correcciones anteriores este método implica un elevado coste computacional.

Por ello, entre los numerosos métodos para modificación de la malla, se ha elegido la resolución de una ecuación de Laplace en el dominio con condición de contorno Dirichlet homogénea en la frontera exterior y con valores prescritos por los desplazamientos sobre el objeto. Esta técnica conserva la conectividad y orientación de la malla por lo que no es necesario realizar verificaciones adicionales. Además permite un control del usuario sobre la deformación de los elementos, imponiendo coeficientes de difusión variables, λ .

De este modo la ecuación para resolver el desplazamiento, \mathbf{d} , de los nodos de la malla vendrá dada por

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot (\lambda \nabla \mathbf{d}) &= 0 \text{ en } \Omega \\ \mathbf{d} &= \mathbf{d}_\alpha \text{ sobre } \Gamma_\nu \\ \mathbf{d} &= 0 \text{ sobre } \Gamma_0 \end{aligned} \right\} \quad (4.40)$$

donde Γ_ν es la frontera constituida por el objeto y $\Gamma_0 = \partial\Omega \setminus \Gamma_\nu$. Fundamentalmente

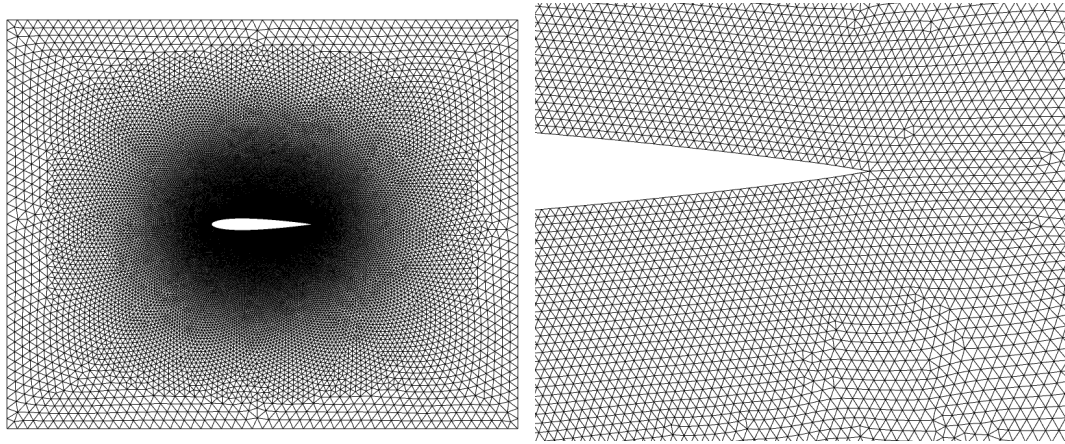


Figura 4.7: *Mallado inicial*

existen dos alternativas para definir el coeficiente de difusión:

- Proporcional a la distancia a la frontera que se desplaza, bien sea de forma lineal, cuadrática o exponencial.
- Proporcional a la densidad de energía de deformación en los elementos.

En la figura 4.7 se muestra el mallado inicial de un perfil NACA 0012 y en 4.8 su posición final y en la figura 4.9 se muestra la ampliación de los resultados del desplazamiento de la malla de un perfil NACA 0012 con distintas implementaciones del coeficiente de difusión. Finalmente se ha optado por emplear un modelo cuadrático al ser el que proporciona mejor relación calidad / coste computacional.

En la puesta en marcha del método se ha observado que para un buen funcionamiento es necesario fraccionar el proceso de modificación de manera que no se produzcan variaciones bruscas, esto es, desplazamientos de los nodos superiores al diámetro de los elementos.

Partiendo de las posiciones de los nodos $\{\mathbf{p}_i^0\}$ y de los desplazamientos de la frontera $\{\mathbf{d}_\alpha\}_{\mathbf{p}_\alpha \in \Gamma_v}$ el método de cálculo para el movimiento de la malla se construye de la siguiente forma:

1. Se obtiene el número de etapas y la fracción de desplazamiento que se va a

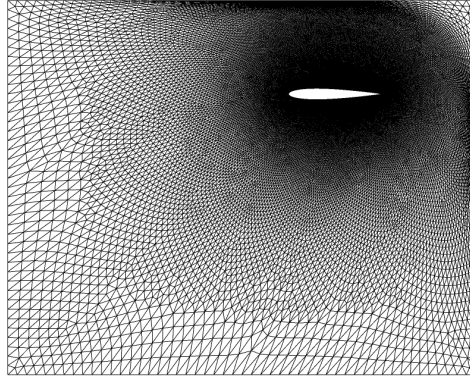


Figura 4.8: *Mallado final*

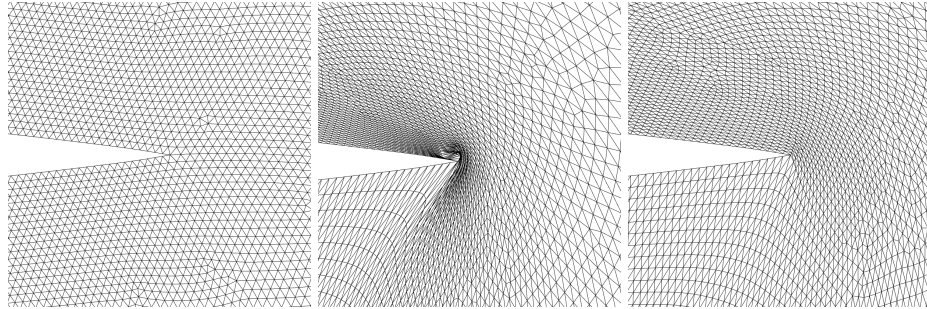


Figura 4.9: *De izquierda a derecha, desplazamiento con el coeficiente de difusión cuadrático, constante y proporcional a la energía de deformación*

incorporar en cada una de ellas:

$$\frac{1}{\delta t} = E \left[c \frac{\max_{\alpha}(\|\mathbf{d}_{\alpha}\|)}{\min_i(\Delta_i)} + 1 \right] \quad (4.41)$$

con $E[t]$ la parte entera de t , $c > 1$ un factor de seguridad, en este caso 1,5.

$$\{\delta \mathbf{d}_{\alpha}\} = \delta t \{\mathbf{d}_{\alpha}\} \quad (4.42)$$

2. Para cada etapa $k = 1, 2, \dots, \frac{1}{\delta t}$:

a) Se calcula el coeficiente de difusión para cada elemento.

$$\lambda_j^k = \frac{1}{l^2}, \quad j = 1, \dots, \text{número de elementos} \quad (4.43)$$

donde l aproxima $\text{dist} \left(\frac{1}{4} \sum_{m=1}^4 \mathbf{p}_m^j, \Gamma_v \right)$ siendo \mathbf{p}_m^j el m -ésimo vértice del elemento j .

- b) Se construye el sistema lineal asociado al operador elíptico relativo a la malla y a los coeficientes de difusión calculados con la condición de contorno $\{\delta \mathbf{d}_\alpha^k\}_{\Gamma_v}$:

$$A_h \delta \mathbf{d}^k = b_h(\delta \mathbf{d}_\alpha^k). \quad (4.44)$$

- c) Se resuelve el sistema lineal (gradiente conjugado preconditionado).
 d) Se actualiza la malla,

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k + \delta \mathbf{d}^k \quad (4.45)$$

4.6. Diseño de la transición entre conductos de distinto diámetro

En el apartado anterior se ha abordado la necesidad de definir un proceso de decodificación específico en la automatización del proceso de diseño óptimo fluidodinámico. En este primer ejemplo que incorpora esta etapa de decodificación, se ha optado por un proceso de deformación de una malla existente para adaptarse a la nueva configuración de la frontera. Así, como aplicación de esta técnica se ha planteado el problema del diseño de una transición entre dos conductos de distinto diámetro. Este es un problema típico de ingeniería en los que han de adaptarse las formas del conducto para reducir las pérdidas de carga en la transición.

El problema estudiado es el diseño de una transición para una tubería que transporta agua dulce pasando de 20 cm de diámetro a 6 cm en 10 cm. Se ha optado por esta transición brusca debido a que es en estos casos donde las pérdidas de carga son más importantes. Debido a la simetría del problema, se ha considerado una tubería circular, se ha realizado un estudio bidimensional del mismo, tomando únicamente, x como dirección longituditudinal, y p como distancia al centro. La malla inicial es una malla estructurada bidimensional de 200 x 100 celdas, lo que proporciona un tamaño medio del elemento de 0.7 milímetros.

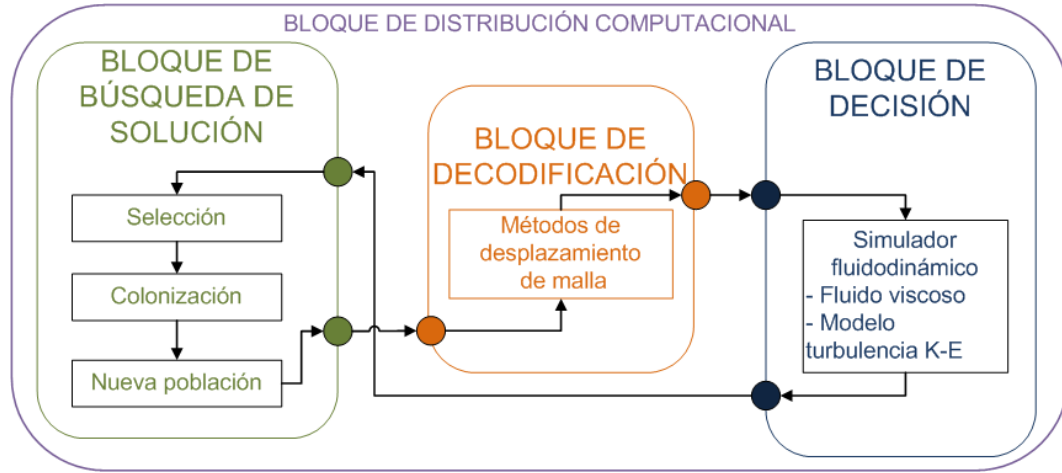


Figura 4.10: Configuración del entorno de diseño aplicado al diseño de contracciones

Para este problema se ha introducido un modelo k-ε de turbulencia. Con el objeto de determinar las condiciones de entrada de estas variables se ha considerado una fluctuación de la velocidad de un 10 % en todas las dimensiones. De esta forma, el valor de entrada resulta:

$$k = \frac{\|u'\|^2}{2} = \frac{u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2}{2} = 0,015 \quad (4.46)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0,75} k^{1,5}}{l} = 0,0302 \quad (4.47)$$

donde C_μ es una constante del modelo de valor 0.09 y l la longitud característica de la turbulencia.

En este problema la transición se define mediante cuatro parámetros. Así, la transición es definida mediante un polinomio de sexto orden, de tal forma que, al introducir las condiciones de contorno: valor inicial y final, y derivada nula en la conexión, la función queda totalmente definida. El cuarto parámetro es un factor escala del desplazamiento, el valor de este parámetro está acotado entre -2 y 2.

Como función de calidad de este problema se ha utilizado las pérdidas de carga entre la entrada y la salida, y para su evaluación se ha impuesto una condición de

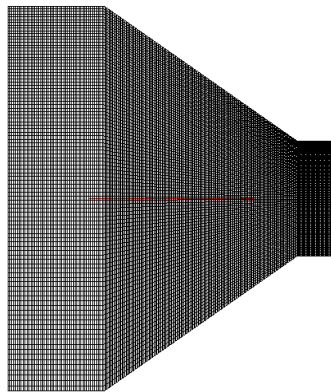


Figura 4.11: *Malla base para la simulación de la contracción*

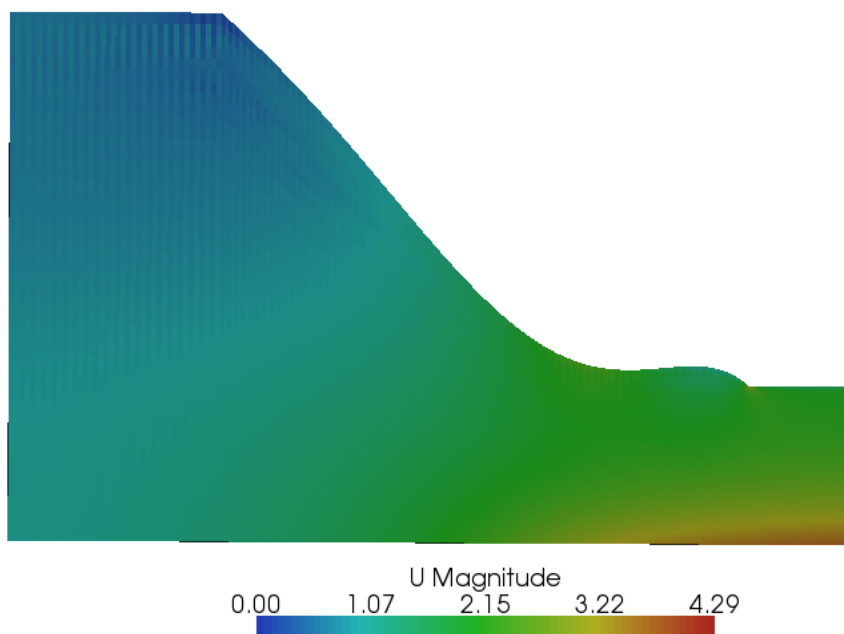


Figura 4.12: *Campo de velocidades para la mejor alternativa*

contorno a la entrada de:

$$\frac{p}{\rho} = 100 \quad (4.48)$$

de tal forma que la función de calidad se evalúa como las pérdidas de carga me-

diante el siguiente procedimiento:

$$f_i = \frac{p_{in}}{\rho} + \frac{v_{in}^2}{2} - \frac{\int_{out} \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} dS}{A_{out}}. \quad (4.49)$$

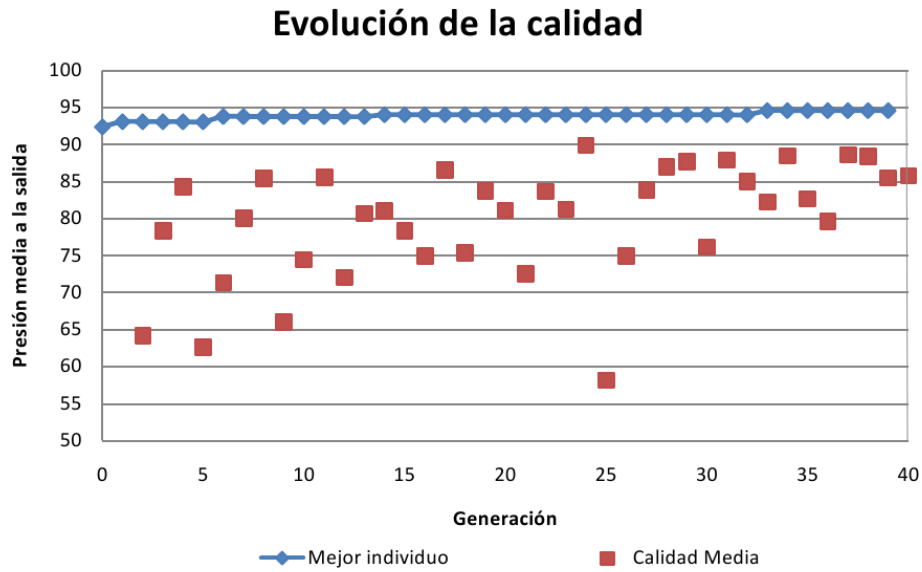


Figura 4.13: Evolución de la calidad para la raza 0

4.6.1. Resultados

Para este experimento se ha optado por utilizar un algoritmo macroevolutivo como estrategia de búsqueda. Para su utilización ha sido necesario seleccionar sus cuatro parámetros característicos: número de razas, número de individuos, número de generaciones y evolución del parámetro τ .

La continuidad en la función de calidad y en su gradiente, junto con el bajo número de parámetros, hace que el espacio de búsqueda sea rápidamente explorado por el entorno de optimización. Es por ello que las pruebas realizadas con distintas configuraciones de los parámetros anteriores convergen a la misma solución. Esto hace que desde las primeras etapas se localicen soluciones próximas al óptimo final. Como caso representativo se muestra la evolución de la raza 0 con 40 generaciones y 16 individuos

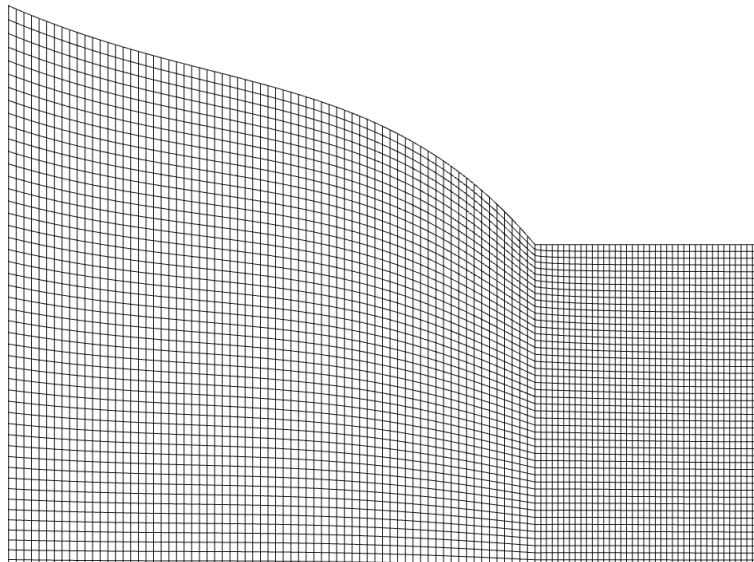


Figura 4.14: Ampliación de la malla deformada

en la figura 4.13. Mediante este procedimiento las pérdidas de carga, se reducen en un 16.21 % respecto al modelo base.

Sin embargo las mejoras producidas debidas a la explotación de los resultados son comparativamente menores. Comparando los resultados de calidad del mejor individuo entre la primera y última generación, la mejora de la calidad oscila entre el 1.5 % y el 4 %, 2.3 % en los resultados mostrados.

Los resultados obtenidos han permitido verificar las ventajas del algoritmo de desplazamiento de malla propuesto. En primer lugar la definición de las alternativas es sencilla ya que sólo se requiere definir la deformación aplicada sobre el modelo base. En segundo lugar la reducción del coste computacional, ya que permite partir de soluciones previas del problema fluidodinámico a la vez que adapta la malla resolviendo una ecuación de Laplace. La malla obtenida, figura 4.14, conserva la calidad de la malla inicial aún en casos complejos como en las esquinas o cambios bruscos en la frontera, en estas situaciones ni el tamaño ni la ortogonalidad de los elementos se ve sensiblemente afectada.

4.7. Problemas bifásicos

En los ensayos anteriores se ha validado la metodología aplicada problemas que involucran el uso de simulación numérica y algoritmos de mallado. Tras estas pruebas se ha estudiado su aplicación a un problema mucho más complejo y clave en la ingeniería naval, la optimización de las formas de carena. Este trabajo se ha estructurado en dos bloques, un primer bloque en el que se estudian las características del simulador bifásico y su implementación, y un segundo bloque de aplicación práctica a la optimización de una carena Wigley.

4.7.1. El modelo bifásico

En los apartados anteriores se ha desarrollado las ecuaciones de Navier-Stokes en el caso de ensayos aero o hidrodinámicos en los que exista una única fase. Sin embargo para la optimización de problemas de ingeniería naval, como las formas de carena, es necesario introducir el efecto de un sistema bifase aire-agua, ya que si bien el comportamiento de cada una de las fases puede resolverse mediante la estrategia planteada anteriormente. Es necesario establecer un sistema adicional que permita capturar la interfase y, con ello, evaluar la resistencia por formación de olas inducida.

Como se ha indicado anteriormente, la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes se realiza mediante la resolución de las ecuaciones de conservación promediadas. Diversos autores han planteado distintas alternativas para las ecuaciones de conservación aplicadas a modelos de dos fases ([93], [94]), aunque se ha optado por seguir el desarrollo de Weller [95] y Hill [96]. En ellos se emplea un promediado condicionado [97], en el que las ecuaciones están multiplicadas por una función indicadora, de valor 1 para la fase ϕ y 0 en cualquier otro caso, posteriormente son aplicadas las técnicas convencionales de promediado. De este modo, para fluidos incompresibles, la ecuación de conservación de la masa y la cantidad de movimiento condicionalmente promediadas para cada fase resultan:

$$\frac{\partial \alpha_\phi \overline{U}_\phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\phi \overline{U}_\phi \overline{U}_\phi) + \nabla \cdot (\alpha_\phi \overline{R}_\phi) = -\frac{\alpha_\phi}{\rho_\phi} + \nabla \overline{p} + \alpha_\phi g + \frac{\overline{M}_\phi}{\rho_\phi} \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial \alpha_\phi}{\partial t} \nabla \cdot (\alpha_\phi \overline{U}_\phi) = 0. \quad (4.51)$$

En donde ϕ indica la fase, α es la fracción de la fase en la celda, \overline{R}_ϕ es el término que contienen los procesos disipativos que recogen los esfuerzos viscosos y los fenómenos turbulentos, y \overline{M}_ϕ es el promedio de la cantidad de movimiento transferido entre las fases.

A partir de la ecuación 4.51, se obtiene la ecuación de continuidad, en volumen, de la mezcla, que se utilizará posteriormente en la ecuación implícita para la presión, resultando de la forma:

$$\nabla \cdot \overline{U} = 0 \quad (4.52)$$

donde

$$\overline{U} = \alpha_1 \overline{U}_1 + \alpha_2 \overline{U}_2. \quad (4.53)$$

En 4.50 y 4.51 se definen las ecuaciones de conservación de masa y de conservación de la cantidad de movimiento para cada una de las fases. A continuación se estudian los términos de disipación y transferencia de cantidad de movimiento necesarios para cerrar el sistema planteado.

4.7.2. Resolución de las ecuaciones

4.7.2.1. Transferencia de cantidad de movimiento

En las ecuaciones promediadas para cada fase, aparece un término de transferencia de cantidad de movimiento \overline{M}_ϕ . Para poder resolver el sistema de ecuaciones propuesto es necesario modelar este término de tal modo que permita cerrar el sistema. Puesto que la cantidad de movimiento global se conserva, la resultante de la transferencia

entre las distintas fases ha de ser cero, es decir,

$$\sum \bar{M}_\varphi = 0. \quad (4.54)$$

Por ello, en el caso de los problemas bifase, como el que se plantea en este caso, sólo se requiere el cálculo de la cantidad de movimiento entrante o saliente en una de las fases ya que la el otro término se puede calcular directamente.

La transferencia instantánea de cantidad de movimiento se puede descomponer atendiendo a los distintos orígenes [98] :

$$\frac{\bar{M}_1 V}{\alpha} = F_d + F_l + F_{vm} \quad (4.55)$$

donde V es el volumen del elemento, F_d es fuerza de resistencia al avance, F_l es la fuerza de sustentación y F_{vm} la fuerza debido a las masa virtual incorporada. Atendiendo a la bibliografía estas componentes pueden expresarse de forma genérica de la siguiente forma

$$\begin{aligned} \bar{M}_1 &= A_d \bar{U}_R && \text{Resistencia} \\ &+ A_{l2} \bar{U}_R (\nabla \otimes \bar{U}_2) + A_{l1} \bar{U}_R (\nabla \otimes \bar{U}_1) && \text{Sustentación} \\ &+ A_{vm} \left(\frac{D\bar{U}_2}{Dt} - \frac{D\bar{U}_1}{Dt} \right) && \text{Masa virtual} \\ &+ A_\alpha \nabla \alpha && \text{Resistencia turbulenta} \end{aligned} \quad (4.56)$$

Donde $U_R = U_2 - U_1$ es la velocidad relativa, y A_d, A_l, A_{vm} y A_α son coeficientes dependientes del modelo utilizado. En este caso se ha empleado el modelo propuesto por Gosman[98], en el que estos términos se calculan de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} A_d &= \alpha_1 \frac{3\rho_2}{4d_1} C_d \|\bar{U}_R\| \\ A_{l1} &= 0 \\ A_{l2} &= \alpha_1 C_l \rho_2 \\ A_{vm} &= \alpha_1 C_{vm} \rho_2 \\ +A_\alpha &= \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_2^v}{d} \bar{U}_R \end{aligned} \quad (4.57)$$

4.7.2.2. Ecuación de conservación

La estrategia de resolución del sistema de ecuaciones propuesto en este apartado es similar al propuesto en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para una única fase, para ello se utiliza la técnica PISO y la estrategia descrita en [95]. Este procedimiento se estructura en la resolución de la ecuación de momento seguido de un bucle de ajuste-corrección de la presión a partir en la ecuación de conservación de la masa que se ha descrito para el caso monofase.

En aquellas celdas en las que sólo exista una fase el sistema de ecuaciones se reduce al modelo monofase que se ha desarrollado al inicio de este capítulo. Por ello a continuación se analiza únicamente el caso en el que en la celda estén presentes las dos fases. Realizando el estudio en los términos convectivos y difusivos de la ecuación 4.50 se obtiene:

$$\frac{\partial \bar{U}_\varphi}{\partial t} + \bar{U}_\varphi \cdot \nabla \bar{U}_\varphi + \nabla \cdot \bar{R}_\varphi + \frac{\nabla \cdot \alpha_\varphi}{\alpha_\varphi} \cdot \bar{R}_\varphi = \dots \quad (4.58)$$

El término \bar{R}_φ puede descomponerse, con la finalidad de facilitar la implementación del sistema, en una componente difusiva y una corrección,

$$\bar{R}_\varphi = \bar{R}_\varphi^D + \bar{R}_\varphi^C \quad (4.59)$$

siendo

$$\begin{aligned} \bar{R}_\varphi^D &= -\nu_\varphi \nabla \bar{U}_\varphi \\ \bar{R}_\varphi^C &= \bar{R}_\varphi + \nu_\varphi \nabla \bar{U}_\varphi \end{aligned} \quad (4.60)$$

De este modo, asumiendo el modelo de viscosidad plantado por Boussinesq, el término de corrección puede calcularse de la siguiente forma:

$$\bar{R}_\varphi^C = -\nu_\varphi \left(\nabla \bar{U}_\varphi - \frac{2}{3} I \nabla \cdot \bar{U}_\varphi \right) + \frac{2}{3} I \bar{k}_\varphi \quad (4.61)$$

Introduciendo este resultado en la ecuación 4.58 y definiendo la velocidad total de fase como

$$\bar{U}_\varphi^T = \bar{U}_\varphi - \nu_\varphi \frac{\nabla \alpha_\varphi}{\alpha_\varphi} \quad (4.62)$$

se obtiene la ecuación del movimiento para el sistema bifase

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{U}_\varphi}{\partial t} + \bar{U}_\varphi^T \cdot \nabla \bar{U}_\varphi - \nabla \cdot (\nu_\varphi \nabla \bar{U}_\varphi) + \nabla \cdot \bar{R}_\varphi^C + \frac{\nabla \cdot \alpha_\varphi}{\alpha_\varphi} \bar{R}_\varphi^C = \dots \\ = -\frac{\nabla \bar{p}}{\rho_\varphi} + g + \frac{\bar{M}_\varphi}{\alpha_\varphi \rho_\varphi} \end{aligned} \quad (4.63)$$

con \bar{M}_φ calculado mediante la ecuación 4.56.

4.7.2.3. Ecuación de fase

La proporción de cada fase se obtiene mediante la resolución de la ecuación de conservación de la masa,

$$\frac{\partial \alpha_\varphi}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\varphi \bar{U}_\varphi) = 0 \quad (4.64)$$

Resolviendo este sistema se puede evaluar fácilmente la fracción de cada fase en cada celda, sin embargo, la aplicación directa de la misma genera problemas de estabilidad así como de cierre. Por ello se introduce en la ecuación la condición del sistema bifase,

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (4.65)$$

De este modo la ecuación para la fase 1 resulta,

$$2 \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \bar{U}_1) + \nabla \cdot (\alpha_1 \bar{U}_2) - \nabla \cdot \bar{U}_2 = 0 \quad (4.66)$$

A partir de esta formulación, siguiendo el procedimiento indicado por Weller [95] y agrupando términos la ecuación de conservación se obtiene

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 \bar{U}) + \nabla \cdot (\alpha_1 \bar{U}_r (1 - \alpha_1)) = 0 \quad (4.67)$$

en donde

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \alpha_1 \bar{U}_1 + \alpha_2 \bar{U}_2 \\ \bar{U}_r &= \bar{U}_1 - \bar{U}_2 \end{aligned} \quad (4.68)$$

4.7.2.4. Procedimiento de resolución

La secuencia de operación para la resolución está basada en un algoritmo PISO empleado para resolver el acoplamiento de la presión – velocidad. Esto requiere un procedimiento de cálculo y la introducción de un bucle de corrección para el ajuste de la solución. De este modo la secuencia de cálculo que se plantea es la siguiente:

1. Se calculan los coeficientes A_d , A_l y A_{vm} , aplicando la ecuación 4.56.
2. Se resuelve la ecuación de momento, 4.63.
3. Se aplica el algoritmo PISO
 - a) Se calcula el flujo a través de las caras de cada celda.
 - b) Se resuelve la ecuación de presión.
 - c) Corrección del flujo.
 - d) Cálculo de la velocidad.
4. Si se ha introducido modelo de turbulencia, resolución de las ecuaciones $k - \epsilon$.
5. Se resuelve la ecuación para el porcentaje de fase, ecuación 4.67.

4.8. Optimización hidrodinámica de las formas de carena

En este capítulo se ha abordado la integración del simulador numérico en un proceso automático de diseño óptimo fluidodinámico. Como conclusión a todo el estudio realizado se ha planteado una prueba final que recoja los resultados del estudio realizado. Buscando un problema característico de la ingeniería naval y de elevados requerimientos computacionales se ha optado por resolver el problema de optimización de las formas de carena. De este modo, este ejemplo se ha planteado como un estudio de la viabilidad de la aplicación a este tipo de problema y posibilitar una nueva línea de investigación.

La progresiva escalada en los precios del combustible hace que cada vez sea más importante mejorar la eficiencia energética de los buques. La importancia de esta mejora tiene dos vertientes fundamentales, por un lado, para las navieras, se reducen los costes de explotación haciendo más rentable la actividad y, por otro, para los astilleros, se les permite ofrecer productos de un mayor valor añadido mejorando su posición frente a otros competidores internacionales. La alternativa que se presenta en este trabajo es la reducción de la resistencia al avance del buque como medio para mejorar la eficiencia energética, ya que, habitualmente, la energía destinada a la propulsión suele ser la principal partida de gasto energético. Si bien existen un elevado número de factores que intervienen en la eficiencia energética del sistema propulsivo, se ha optado por iniciar esta tarea actuando sobre el primer eslabón del sistema, la resistencia al avance del buque.

Para realizar este proyecto de reducir la resistencia al avance del buque es necesario resolver dos aspectos fundamentales, en primer lugar, como evaluar la resistencia al avance de unas formas dadas y, en segundo lugar, como mejorar las formas dadas.

El estudio sistemático de la influencia de las formas del casco en la resistencia al avance fue iniciado por W. Fraude a mediados del siglo XIX. Sin embargo, no ha sido hasta las últimas décadas del siglo XX, cuando coincidiendo con un importante impulso al análisis experimental y con la aparición de los CFD's (Computational Fluid Dynamics), se inician los trabajos para elaborar métodos sistemáticos para la optimización de formas. Las principales dificultades que tienen que superar estos sistemas puede resumirse en:

- Alto coste computacional de las simulaciones numéricas requeridas en estos procesos.
- Alto coste de los ensayos experimentales para validación de los resultados.
- Necesidad de una eficiente definición paramétrica de las formas tridimensionales de la carena.
- Necesidad de estructuras de cálculo flexibles que permitan su implementación en entornos reales de diseño.

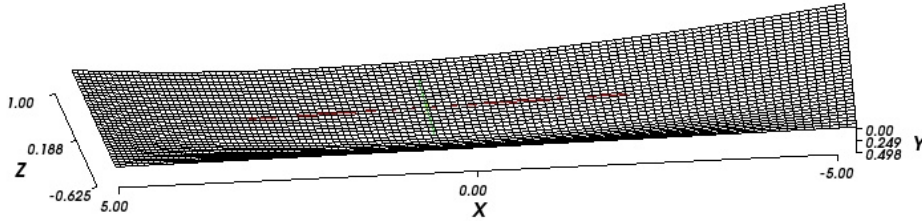


Figura 4.15: Representación tridimensional del casco

4.8.1. Definición del experimento

Como experimento de verificación del proceso de optimización de las formas de carena se ha optado por aplicar el sistema a una morfología básica, un modelo de carena Wigley. Los puntos de la carena utilizada se define de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} -0,5 \leq \xi \leq 0,5, -0,5 \leq \eta \leq 0,5 \text{ y } 0 \leq \zeta \leq 1 \\ \eta = (1 - \zeta^2)(1 - \xi^2)(1 + 0,2\xi^2) \end{aligned} \quad (4.69)$$

De tal forma que multiplicando ξ , η , ζ , por la semieslora, semimanga y el calado, respectivamente se obtiene la definición dimensional del casco. En el caso estudiado se ha considerado:

- Eslora = 10 m.
- Manga = 1 m.
- Calado = 0.5 m

Con la finalidad de reducir el coste computacional del proceso y aprovechando la simetría del sistema se ha optado por modelar únicamente el flujo correspondiente a media carena, de esta forma el dominio utilizado por la simulación mide 85 m x 25

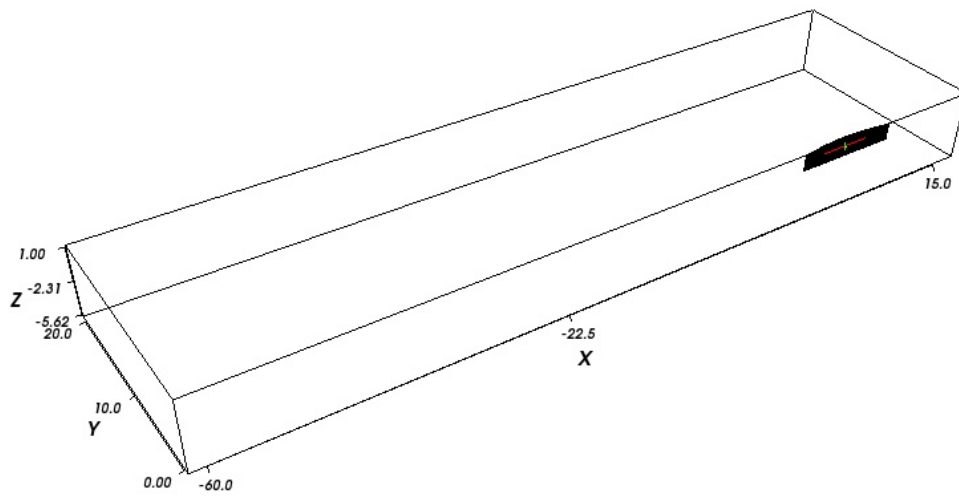


Figura 4.16: Esquema del dominio de simulación

m x 7 m. El dominio se discretiza en 1798776 celdas de un tamaño de 10 cm en las proximidades del casco y de 50 cm en las regiones de salida.

Las propiedades de los fluidos utilizados en esta simulación son los siguientes:

■ Fase líquida

- $\rho = 1035 \text{ kg/m}^3$
- $\nu = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

■ Fase gas

- $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$
- $\nu = 1,48 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Para la realización del experimento se ha considerado

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} = 1 \quad (4.70)$$

que se corresponde en la condición de funcionamiento de un buque de 100 m de eslora a una velocidad de 19.44 nudos.

La función de calidad que se ha empleado en este caso es el inverso del coeficiente de resistencia calculado del siguiente modo:

$$C_r = \frac{|F_x|}{\frac{1}{2}\rho v^2 A_t} \quad (4.71)$$

donde A_t es el área transversal proyectada de la carena.

En el experimento que se ha desarrollado se plantea la mejora de las formas introduciendo deformaciones en las mismas. Los parámetros que se analizan en este caso son los siguientes:

- Posición longitudinal del valor máximo de la deformación, α .
- Posición vertical del valor máximo de la deformación, β .
- Valor de la máxima deformación, γ .

De tal forma que la función deformación resultante es:

$$F(x, z) = \frac{\gamma}{A_g A_h} g(x) h(z), \quad \alpha \in [-5, 5] \quad (4.72)$$

en donde las funciones $g(x)$ y $h(z)$ se definen como:

$$g(x) = (x^2 - 25)(x^2 + 25 - 2\alpha^2), \quad \alpha \in [-5, 5] \quad (4.73)$$

$$h(z) = (z + 0,5)(z + 0,5 - 2\beta), \quad \beta \in [-0,5, 0] \quad (4.74)$$

y A_g y A_h se calculan de la siguiente forma:

$$A_g = -(\alpha^2 - 25)^2 \quad (4.75)$$

$$A_h = 0,25 - \beta^2 \quad (4.76)$$

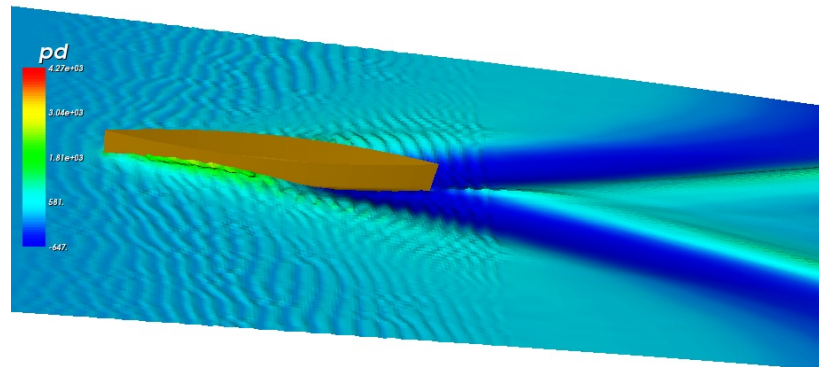


Figura 4.17: *Campo de olas generado por la carena Wigley*

Con la finalidad de disminuir el tiempo de computo requerido para las evaluaciones, todas las simulaciones se inician con el campo de presiones y velocidades resultado de la simulación de la carena Wigley sin ninguna modificación.

Se ha utilizado un algoritmo macroevolutivo en el que la población total se ha dividido en razas que evolucionan por separado produciéndose migraciones locales entre las vecinas y migraciones globales (los mejores individuos de una raza migran a las otras). Los parámetros del proceso de evolución son:

- Número de razas: 2.

- Población: 16.

- Generaciones: 10

- Migración local: 8

- Migración global: 8

- $\tau = \frac{generaciones_{total} - 0,9generacion_{actual}}{generaciones_{total}}$

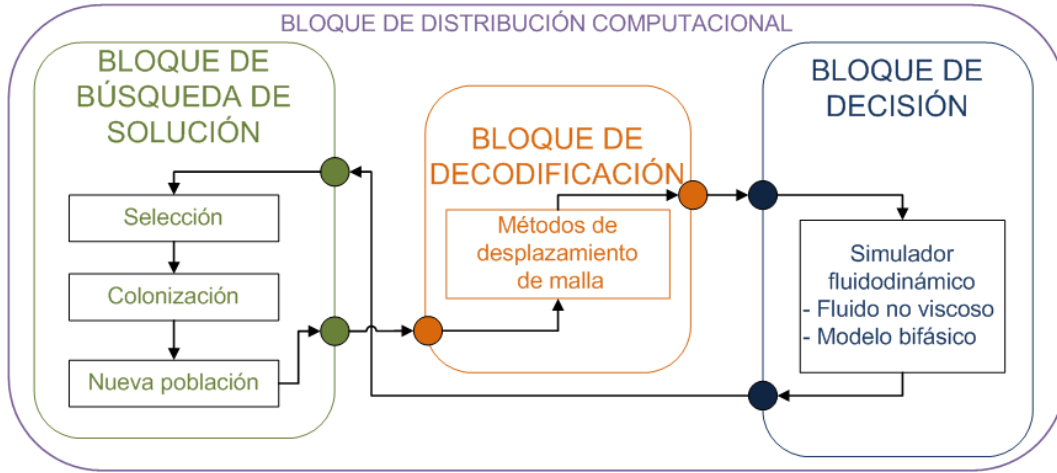


Figura 4.18: Configuración del entorno de diseño aplicado al problema de diseño de carenas

4.8.2. Resultados

El experimento implementado se han ejecutado en un cluster de cuatro nodos de dos procesadores AMD, *OpteronTM* Processor 244, a 1.800 MHz y con 4Gb de memoria RAM. En las siguientes gráficas se muestran los resultados de las pruebas realizadas. Para facilitar la representación de los datos en las gráficas en las mismas se muestra el porcentaje de mejora respecto al modelo inicial:

$$\%mejora = \frac{C_{wiglet} - C_{calculado}}{C_{wiglet}} \cdot 100. \quad (4.77)$$

Las restricciones impuestas al modelo, una deformación máxima del 5 %, han conseguido mejoras en el rendimiento, sin embargo será necesario realizar un cuidadoso proceso de validación experimental de los resultados para verificar la calidad cuantitativa de los resultados. En la figura 4.19 se muestra la caja de cuaderna comparada entre el modelo inicial y la mejor alternativa encontrada.

La duración del proceso de ejecución de las pruebas es de 15 horas cada una, lo que se corresponde a 120 horas de cálculo. La población evaluada, 16 individuos, es pequeña, sin embargo se observa que con ella se obtienen mejoras significativas en el rendimiento, superando el 8 %, figura 4.20. A través de una mejora en el simulador,

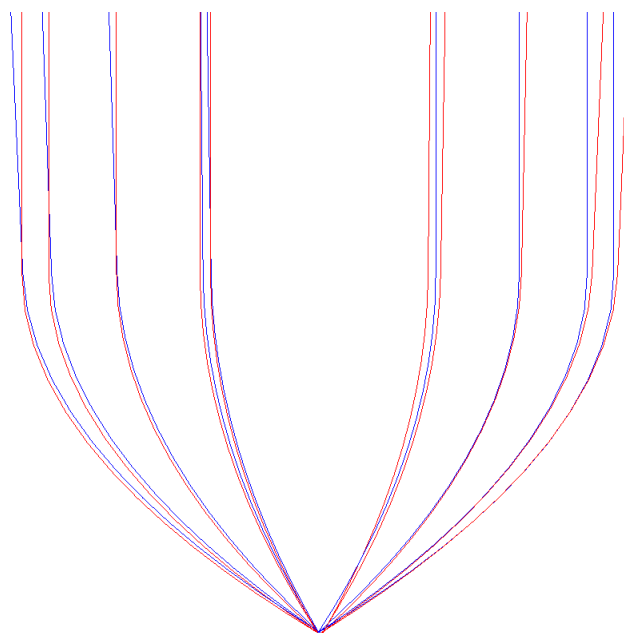


Figura 4.19: Caja de cuernas del modelo inicial (Azul) y el modelo final (rojo)

especialmente destinada a la validación de los resultados y del incremento de la potencia de cálculo disponible, el sistema planteado puede aplicarse a la optimización de una carena real, especialmente si ésta se centra en una región concreta de la misma. La ventaja del sistema planteado es que, evitando o reduciendo el preconditionado de la solución por el diseñador, se permite localizar soluciones no convencionales al problema propuesto.

4.8.3. Conclusiones del experimento

Este procedimiento utilizado permite resolver modelos no lineales muy complejos como es el caso de optimización de problemas de hidrodinámica naval en el que interviene un gran número de parámetros para la determinación de la forma del casco, con una respuesta muy compleja del sistema debido a la interacción fluido – casco con la existencia de superficie libre y formación de olas. Además las condiciones del flujo son muy sensibles a la modificación de las condiciones de contorno.

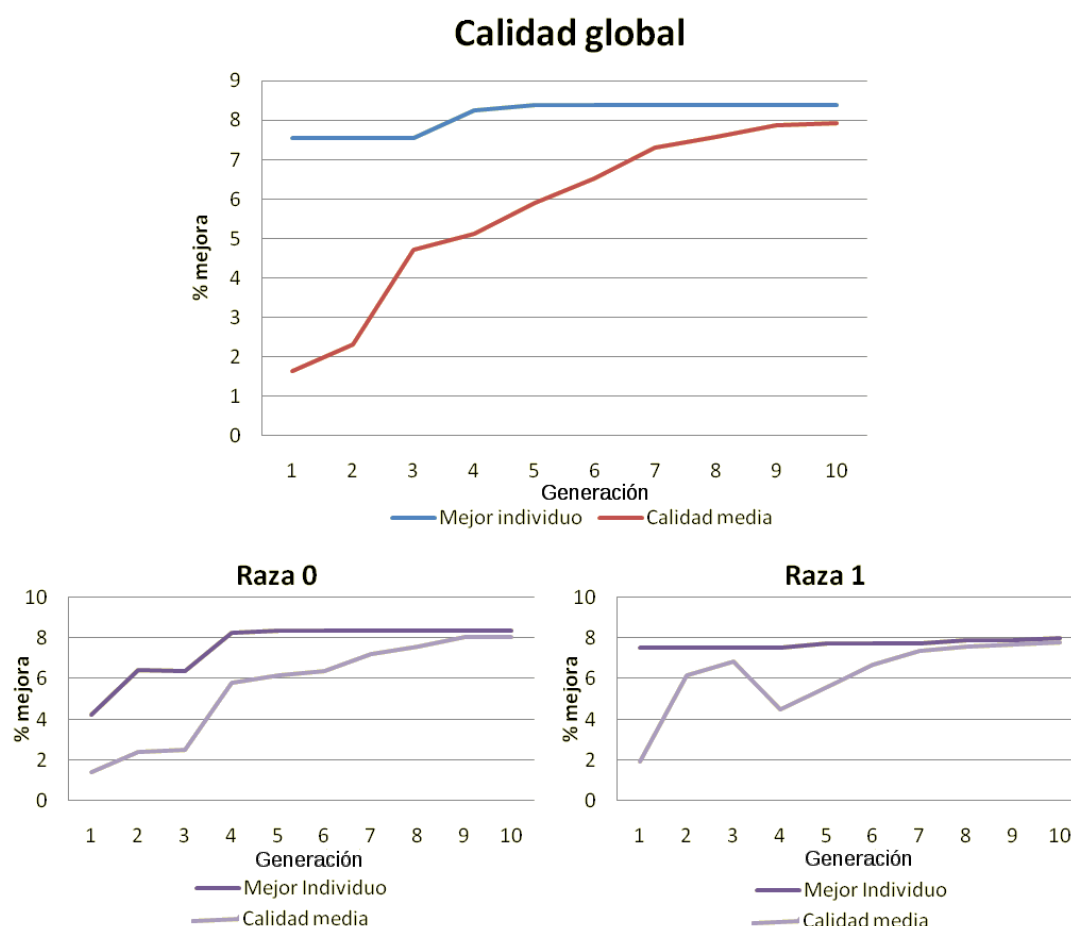


Figura 4.20: Evolución de la calidad

Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto la aplicabilidad del procedimiento descrito. Las principales dificultades detectadas han sido, por una parte el alto coste computacional y, por otro, el realismo de los valores proporcionados por el simulador. La primera dificultad es inherente al propio problema abordado y, por tanto, la alternativa es aumentar los recursos computacionales disponibles. Respecto al segundo, es necesario un ajuste de los parámetros utilizados por el simulador o introducir alguna corrección con el objetivo de mejorar los resultados. Sin embargo, puesto que este ejemplo se ha planteado como un estudio de la viabilidad de la aplicación a este tipo de problema y posibilitar una nueva línea de investigación, los resultados alcanzados han sido satisfactorios con el objetivo planteado.

4.9. Conclusiones a la aplicación proceso de modificación del mallado

Los ejemplos de aplicación analizados muestran el proceso de integración de un simulador fluidodinámico en la automatización del proceso de diseño. Dos aspectos son los que constituyen las principales dificultades a resolver: la selección del simulador y la generación de la malla.

La selección del modelo numérico para el fluido la realiza el diseñador en función de las características del problema específico. Aunque la elección de este modelo no siempre es sencilla y siempre viene condicionada por la capacidad de cálculo disponible, la integración en el proceso de diseño no es compleja. La integración, en estos casos, está restringida a la transferencia de la información entre los distintos módulos.

El otro punto crítico del proceso de simulación es la generación de la malla. En este proceso no sólo incluye la calidad de la malla si no que también es necesario considerar el procedimiento de definir las nuevas alternativas. El método de deformación de la malla no solo preserva la calidad de la malla generada sino que además permite una definición de cada alternativa mediante deformación de un modelo previo.

La resolución del desplazamiento de los nodos de la malla mediante una ecuación de Poisson posibilita, con un bajo coste computacional, adaptarse a la deformación impuesta sobre la frontera original sin que ello genere elementos degenerados. En las pruebas se ha visto que el método se plantea como un método especialmente útil en aquellos problemas en los que se parte de una malla estructurada y se busca preservar esa característica de la malla.

Los resultados obtenidos han mostrado el correcto funcionamiento del algoritmo de deformación de la malla. Si bien la configuración de la malla del problema puede considerarse sencilla frente a otros casos considerados, la eficiencia del procedimiento hace que sea comparable a la generación de una nueva malla estructurada. En el caso concreto del timón, en el que el desplazamiento se realiza en tres etapas y con un coeficiente de difusión calculado previamente y que permanece constante durante todo el desplazamiento. Así para una malla con 24000 celdas y en un

Dual – CoreAMDOpteron(tm)Processor2212, el proceso de creación de la malla requiere de 2.09 segundos frente a los 3.60 segundos del proceso de desplazamiento de malla. En el caso de la generación de una malla no estructurada de prismas triangulares, el tiempo de cálculo se eleva a los 6.74 segundos, un 87.5 % mayor que los procedimientos de deformación. Sin embargo el coste computacional del proceso de deformación es función del número de etapas intermedias que se requieren. Por ello, cuando el desplazamiento de la frontera es muy alto el coste computacional puede ser equivalente al de generar una nueva malla.

Sin embargo, cuando se abordan geometrías extremadamente complejas o no es posible explicitar una función de transformación es necesario utilizar otros procedimientos distintos del de deformación de malla y es por ello por lo que en el siguiente capítulo trataremos el método de inmersión de frontera.

Capítulo 5

Diseño óptimo de velas de competición

En este capítulo se aborda un problema del diseño óptimo de velas de competición. Se ha escogido este problema como muestra de aplicación final de la estructura de diseño desarrollada en este trabajo al ser uno de los problemas más complejos dentro del área de la aerodinámica de aplicación naval. Para abordarlo se ha planteado la utilización de un simulador basado en el método de la inmersión de frontera corregido mediante ensayos experimentales.

En los últimos años, la vela ha experimentado un importante desarrollo debido a la creciente popularidad de la náutica deportiva. La revolución técnica que ha sufrido este campo está motivada por competiciones como la *America's Cup* y la *Volvo Ocean Race*. Así, se han desarrollado nuevos diseños que han requerido mejores herramientas basadas en la simulación numérica, ensayos en canales hidrodinámicos, experimentos en túnel de viento y los nuevos materiales. Para resolver estos problemas se utilizan simuladores de dinámica de fluidos CFD [99]. Estos modelos numéricos son herramientas de análisis y diseño que han logrado un importante desarrollo, proporcionado resultados realistas en el comportamiento de la vela [100].

Además, los recientes incrementos en los precios de los combustibles y los nuevos requisitos de eficiencia energética han hecho reconsiderar el uso de nuevos diseños de velas en la pesca y buques comerciales. De este modo en los últimos años se han realizado distintos estudios para analizar los efectos de las velas, [101] [102], que muestran las aplicaciones futuras de esta “nueva” tecnología y su efecto económico en

la explotación de buques.

5.1. Estructura del proceso de evaluación

El proceso de simulación seguido en este experimento se ha dividido en cuatro etapas:

1. **Generación de la superficie de la vela.**
2. **Generación de la malla.** Como se indicó en el capítulo anterior, en este problema se analizará el uso métodos de inmersión de frontera para la generación de la malla.
3. **Resolución del modelo número del flujo.** Definida la malla y las condiciones de contorno se resolverán las ecuaciones que rigen el comportamiento del fluido. Para la selección de este modelo se han analizado diferentes alternativas para poder seleccionar aquella que se adecue mejor al problema concreto.
4. **Integración de las presiones.** Las fuerzas resultantes se obtendrán mediante la integración de las presiones sobre cada una de las caras de la vela.

Este proceso de optimización requiere un gran número de evaluaciones de distintas posibles soluciones. Por lo tanto, el número de ellas y el coste computacional de cada uno determinará la duración del proceso de optimización. Así, mejoras en el módulo de búsqueda permiten a reducir el número de evaluaciones requeridas para alcanzar el óptimo. Sin embargo, también es necesario reducir el coste de cada simulación con el objeto de disminuir, aún más, sus requisitos computacionales. Por ello, si buscamos una solución para este problema de optimización en un intervalo de tiempo aceptable, debe reducirse la duración de cada proceso de simulación.

Normalmente la reducción del coste computacional de la simulación lleva asociada una reducción de la calidad o realismo de los resultados. Esto hace necesario que haya que buscar un equilibrio entre ambos parámetros, calidad y coste computacional, para obtener los resultados esperados.

Como ya se ha indicado en el capítulo anterior, la calidad de los resultados de la simulación está relacionada principalmente con dos factores:

- La calidad de la malla, especialmente el tamaño de la celda.
- El modelo numérico que rige el comportamiento del fluido.

En el capítulo 2 se han descrito distintas posibilidades para modelar el comportamiento del aire en torno a la vela. Para este problema se analizarán distintas posibilidades para esta modelización, así comparando la calidad obtenida y su coste computacional se seleccionará el más adecuado. Para la definición de esta calidad, es necesario resaltar que en el proceso de optimización evolutiva lo que se requiere es una ordenación de las soluciones. Por ello, aunque cuantitativamente los resultados no sean exactos, mientras cualitativamente y en términos de ordenación sean adecuados, los resultados obtenidos son aceptables.

La consideración anterior permite el uso de procesos de simulación simplificados. De todos modos se pueden simplificar aún más se corrigen los resultados. Esta es la aproximación seguida en este proceso en la que se ha utilizado un sistema redes neuronales artificiales entrenada con con ensayos experimentales. Esta técnica ha permitido incrementar sensiblemente la calidad de los resultados sin modificar el coste computacional de la evaluación.

5.2. Definición de la superficie de la vela

Tal y como se ha visto, en el proceso de optimización propuesto cada uno de los procesos utiliza una representación de la alternativa diferente. El proceso de búsqueda utiliza el genotipo, una representación paramétrica, y el simulador requiere el fenotipo, la representación tridimensional del modelo en su medio. Esto hace necesario establecer una fase de decodificación que permita la comunicación entre cada uno de los módulos del entorno de diseño[103]. El número de alternativas para realizar la definición de estas superficies es elevado. Sin embargo con el objeto de simplificar el proceso se busca:

- Un reducido número de parámetros.
- Una definición simple de la superficie, con un proceso de generación con un bajo coste computacional y permitiendo que se puedan interpretar el significado de los parámetros que definen la superficie.

Por estos motivos se ha optado por el uso de superficies NURBS, *Non Uniform Rational B-Splines* para la definición de la forma de la vela. Las principales ventajas de estas superficies pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Las NURBS son definidas como un conjunto de puntos de control. Esto permite una sencilla manipulación de la superficie y facilita la implementación de los algoritmos de importación y exportación de estas superficies entre diferentes programas de simulación y diseño.
- Estos puntos de control no son parte de la superficie. Así la curvatura de la superficie se controla como un proceso de atracción desde los puntos de control más cercanos. De este modo se evitan fuertes cambios en la curvatura que aparecen en otros métodos como, por ejemplo, las splines.
- Cada punto de la superficie se calcula promediando la influencia de los puntos de control más próximos. Así el desplazamiento de un punto de control sólo afecta a los puntos de la superficie cercanos.

Las funciones base utilizadas en la definición de las curvas NURBS se denotan como $N_{i,n}(u)$, en donde i se corresponde con el i -ésimo punto de control, y n con el orden de la función. La función $N_{i,n}$ se calcula como:

$$N_{i,n} = f_{i,n}N_{i,n-1} + g_{i+1,n}N_{i+1,n-1} \quad (5.1)$$

f_i crece linealmente desde 0 a 1 en el intervalo donde $N_{i,n-1}$ no es nula, mientras g_{i+1} decrece desde 1 hasta 0 en el intervalo en que $N_{i+1,n-1}$ no es nula. Si u es el parámetro, y k_i es el k -ésimo nodo, las funciones f y g pueden escribirse como:

$$f_{i,n}(u) = \frac{u - k_i}{k_{i+n} - k_i} \quad (5.2)$$

y

$$g_{i,n}(u) = dfrac{k_{i+n} - uk_{i+n} - k_i}{k_{i+n} - k_i} \quad (5.3)$$

Las funciones f y g son positivas cuando las funciones base de orden inferior no son nulas. Usando las definiciones previas de las funciones base, una curva NURBS puede calcularse como:

$$C(u) = \sum_{i=1}^k \frac{N_{i,n}w_i}{\sum_{j=1}^k N_{j,n}w_j} P_i \quad (5.4)$$

En donde, k es el número de nodos de control y P_i y w_i son sus correspondientes pesos. El denominador es un factor de normalización, este término tiene valor uno si todos los pesos son uno. En este caso puede escribirse como:

$$C(u) = \sum_{i=1}^k R_{i,n} P_i \quad (5.5)$$

siendo

$$R_{i,n} = \frac{N_{i,n}w_i}{\sum_{j=1}^k N_{j,n}w_j} \quad (5.6)$$

la función base racional.

De este modo, el número de parámetros usados para definir la forma de la vela puede ser fácilmente adaptados a cada experimento. Estos parámetros definen la posición y peso de los distintos puntos de control, directamente o a través de una función de forma.

5.3. Generación de la malla - Método de inmersión de frontera

Una de las principales dificultades que se plantea el método de deformación de malla, que se ha planteado en el capítulo anterior y que lo hace poco adecuado para este

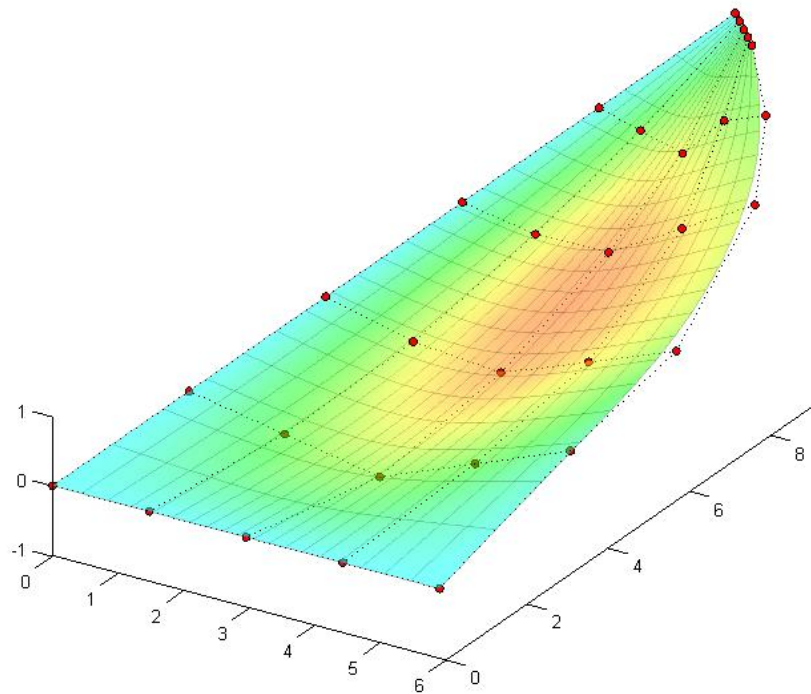


Figura 5.1: Definición de la vela mediante una superficie NURBS

caso, es su coste computacional y las dificultad de control sobre la malla resultante. Por lo tanto se requiere de un proceso adicional de generación de la malla para cada posible solución que permita solventar estos problemas. Como alternativa a los procedimientos de desplazamiento o generación de malla se plantea aquí la utilización de un método distinto, el método de inmersión de frontera.

El método de inmersión de frontera (Immersed boundary method, IBM) fue introducido por primera vez en 1972 por Peskin [104], aunque posteriormente se han introducido importantes mejoras en el método de cálculo, destacándose los trabajos de Mulas [105], Goldstein [106] y Saiki [107].

El planteamiento inicial del método de inmersión de frontera se basa la que el cuerpo sólido no se introduce como tal en la malla del dominio fluido como una parte de su frontera, si no que su efecto se simula mediante la introducción una fuerza virtual. El objetivo de estas fuerzas virtuales es que, una vez introducidas en la ecuación de la

conservación del momento que rige el fluido 2.2, por ejemplo, hagan nula la velocidad del fluido en los puntos deseados. Esto implica que la malla no se adapta a la forma de la frontera sino que, mediante la introducción de elementos adicionales en el proceso de resolución del flujo, se puede simular la existencia del cuerpo sólido.

Para los procesos de diseño en los que han de analizarse un número elevado de alternativas esto supone dos ventajas importantes:

- No es necesario generar una nueva malla para cada alternativa, sólo se requiere introducir en las ecuaciones las características de la nueva frontera.
- Permite utilizar mallas cartesianas y / o extruidas, esto hace que sea posible implementar en el código de resolución del problema simplificaciones que reduzcan el coste computacional del mismo.

Sin embargo, el uso del modelo inicial presenta problemas de convergencia y estabilidad de la solución en problemas tridimensionales. Es por ello que se han desarrollado nuevas estrategias tales como [108], [109], [110] y [111], para complementar el método buscando solventar los problemas del modelo inicial. En ellos se actúa sobre la definición de las celdas frontera para mejorar la convergencia del método mediante la introducción de nuevas ecuaciones o una reconstrucción de la región frontera. Una alternativa diferenciada fue planteada por Kim [112] en la que ya desarrolla un IBM en el que se combina la introducción de fuerzas virtuales con la de fuentes y sumideros másicos. Partiendo de este planteamiento, Fadlun [113] y Verzicco [114], desarrollan el *immersed boundary method* mediante el empleo de celdas fantasma, que es el procedimiento empleado en el bloque de decodificación que se presenta.

5.3.1. Método de la celda fantasma

El método de la celda fantasma inicialmente surgió como método para la reconstrucción de la interfase en problemas bifásicos ([115] y [116]), desarrollando estrategias de interpolación para la definición de las regiones de cambio de fase en el interior de celdas existentes del dominio. Este método proporciona una gran flexibilidad en la

imposición de condiciones de contorno diversas, ya que en este método la definición de las condiciones de contorno se consigue al extrapolar el valor de las variables desde las celdas fantasma generadas para introducir la nueva frontera.

5.3.1.1. Métodos numéricos

Para realizar el análisis de este método es necesario partir de las ecuaciones de conservación de la masa y del momento, a las cuales se introduce el término f_i como la variable de fuerza en la frontera:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial F_{ij}}{\partial x_j} = f_i, \quad (5.8)$$

donde el flujo es:

$$F_{ij} = u_i u_j + \frac{P}{\rho} \delta_{ij} - \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.9)$$

Esta fuerza virtual f_i es el elemento que se introduce a través de las celdas fantasma estando sólo activa en la frontera.

Para cada paso de tiempo esta nueva ecuación de conservación de la cantidad de momento se tiene que ser definidir para cumplir estas condiciones de contorno [113], ya que este término adicional de fuerza depende no sólo de su posición sino, también, de la velocidad del fluido y, por tanto, es cambiante en el tiempo. Puesto que la posición x_i de esta fuerza no suele ser coincidente con los nodos de las malla, han de establecerse funciones de interpolación que evalúen su valor en cada nodo. El valor de esta fuerza f_i puede evaluarse en las zonas de las celdas fantasma, fuera de estas regiones su valor es nulo. Puede calcularse a partir de la discretización de la ecuación 5.8 de la forma:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = RHS_i + f_i, \quad (5.10)$$

donde RHS_i recoge los términos convectivos, viscosos y de gradiente de presión.

El método de las celdas fantasma extrapola la velocidad V_i^{n+1} y la presión de la celda fantasma, del tal forma que la fuerza f_i puede obtenerse como:

$$f_i = -RHS_i + \frac{V_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} \quad (5.11)$$

Se han desarrollado muchas técnicas para establecer la posición y valores de las celdas fantasma. Estas pueden clasificarse en dos grupos: las que distribuyen la función de fuerza sobre los nodos adyacentes a la superficie de frontera y las que buscan la reconstrucción de la solución a partir de los valores en la frontera. Si bien ambas alternativas son equivalentes, es la segunda estrategia la que proporciona una mayor flexibilidad y mayores órdenes de precisión. El esquema de este algoritmo es el siguiente:

1. Determinar la frontera y las celdas fantasma.
2. Realizar los esquemas de interpolación para calcular el valor de la celda fantasma requerida para imponer la condiciones de contorno.
3. Cálculo del nuevo campo de velocidades con el nuevo valor de las celdas fantasmas [112] [79].
4. Resolución de la ecuación de Poisson de la presión.

$$-\Delta p = \rho \nabla \cdot (\nabla \cdot (\mathbf{u} \otimes \mathbf{u})). \quad (5.12)$$

5. Actualización del campo de velocidades u_i^{n+1} para el siguiente instante de tiempo.

El proceso de determinación de las celdas fantasma se realiza en una etapa de pre-procesado previo. En primer lugar se determina la intersección de la superficie con las caras de las celdas, de tal modo que el dominio queda dividido en dos regiones, un dominio físico y un dominio que pertenece a las celdas fantasma, un ejemplo de esto puede verse en la figura 5.2.

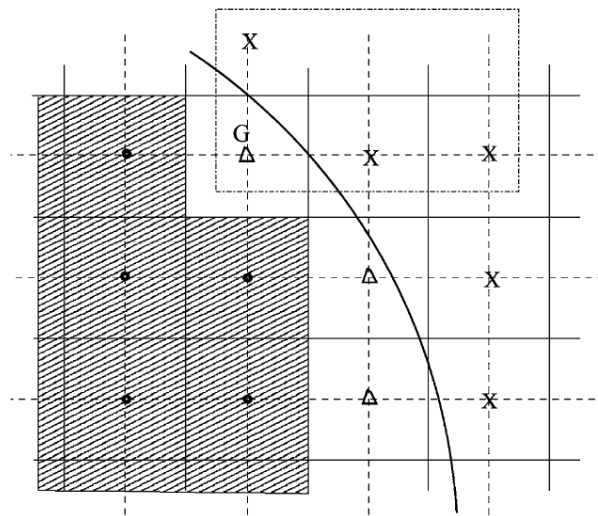


Figura 5.2: Esquema de una malla con inmersión de frontera, X representa los nodos pertenecientes al dominio fluido y Δ las celdas fantasma

El dominio físico es donde existe fluido y las celdas fantasmas se sitúan en la parte interior del sólido. La velocidad en estos nodos virtuales se calcula a partir de las celdas vecinas de tal modo que, aplicando el esquema de interpolación seleccionado, la velocidad en la frontera sea la deseada.

5.4. Simulación numérica

En los apartados anteriores se ha analizado la importancia del simulador en el proceso de optimización. En primer lugar se analizará el modelo numérico más adecuado para los problemas de diseño óptimo de velas abordados. Con el objetivo de, utilizando un simulador del menor coste computacional, obtener los resultados lo más realistas posibles se han desarrollado un procedimiento para su corrección basado en redes neuronales artificiales y ensayos experimentales en túneles de viento.

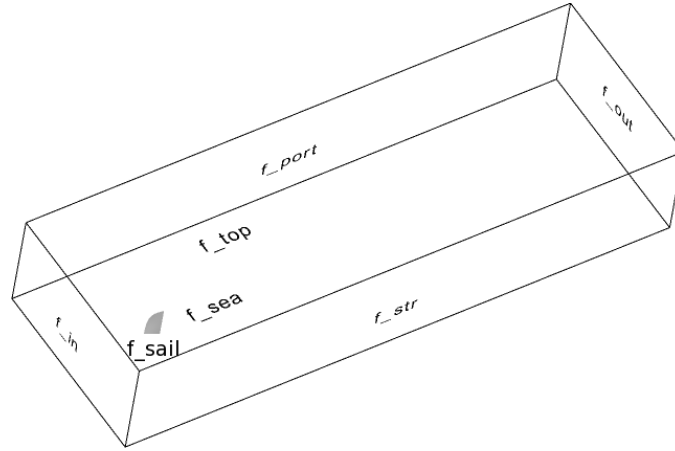


Figura 5.3: Dominio del ensayo aerodinámico

5.4.1. Análisis comparativo de los distintos modelos aerodinámicos

El objetivo de estos ensayos es comprobar la robustez del algoritmo de discretización y resolución de las ecuaciones en derivadas parciales del comportamiento del fluido aplicado al estudio aerodinámico de velas para navegación. Se trata de comparar tres modelos diferentes: el de flujo laminar y los de $k - \epsilon$ y LES (Large Eddy Simulation) para flujos turbulentos, con el fin de evaluar la relación coste computacional y calidad de los resultados de cada uno de ellos. Para ello se ha estudiado el comportamiento del aire en torno a una vela.

El dominio es un paralelepípedo de $160 \times 60 \times 40$ metros con la vela situada a 30 metros de la entrada del flujo, (figura 5.3). Para los ensayos numéricos se ha utilizado una malla tridimensional no estructurada de tetraedros realizada con GMSH¹ de 2.811.679 celdas lo que da una vela constituida por 8186 caras. El diámetro de los elementos en las proximidades de la vela es de 0,1 m y en la frontera de salida 0,5 m.

5.4.1.1. Flujo incompresible laminar estacionario

El primer ensayo se ha realizado para un modelo flujo incompresible, laminar y estacionario. Tanto en este caso como en el modelo LES se ha tomado como punto

¹<http://www.geuz.org/gmsh/>

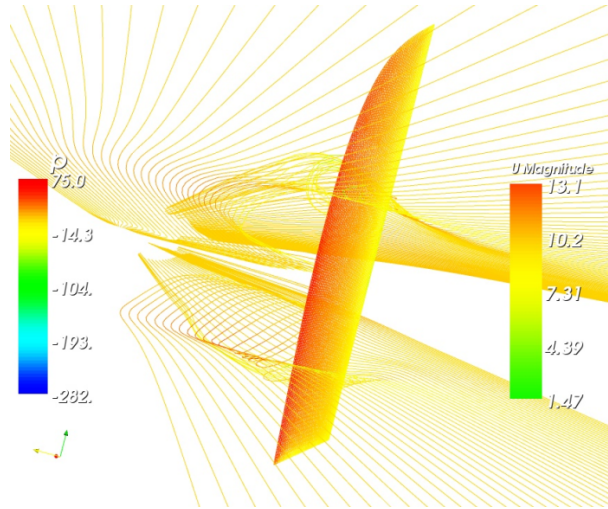


Figura 5.4: Líneas de corriente sin modelo de turbulencia a la altura de 5 y 10 metros

inicial del algoritmo iterativo la solución de un modelo de flujo potencial calculado previamente.

5.4.1.2. Flujo incompresible turbulento estacionario. Modelo $k - \epsilon$

En la segunda simulación se incorpora el modelo de turbulencia $k - \epsilon$, habiéndose empleado los siguientes parámetros: $C_\mu = 0,09$, $C_{1\epsilon} = 4$, $C_{2\epsilon} = 1,92$, $\sigma_k = 1$ y $\sigma_\epsilon = 1,2$.

Las condiciones de contorno para la energía cinética turbulenta y la disipación han sido tomadas de [117]:

- en f_{sail} y f_{out} , $\nabla k \cdot \mathbf{n} = 0$ y $\nabla \epsilon \cdot \mathbf{n} = 0$
- en f_{in} , f_{sea} , f_{port} , f_{str} , f_{top} , $k = 3,33 \|\mathbf{u}_*\|^2$ y $\epsilon = \frac{\|\mathbf{u}_*\|^3}{K(z+z_0)}$.

Se han realizado dos ensayos numéricos, uno tomando como punto inicial el resultado de el modelo de flujo potencial y otro con la salida del test anterior, donde se ponen de manifiesto sólo pequeñas diferencias. En las figuras 5.6 y 5.7 se muestran los resultados obtenidos para el segundo caso con este modelo.

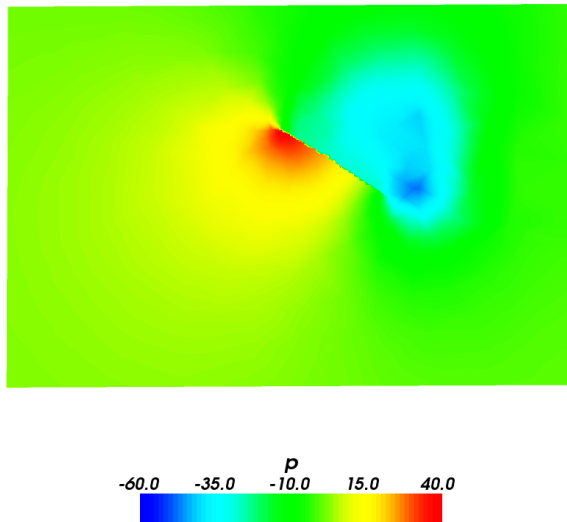


Figura 5.5: Representación de la presión en $z = 10$ m

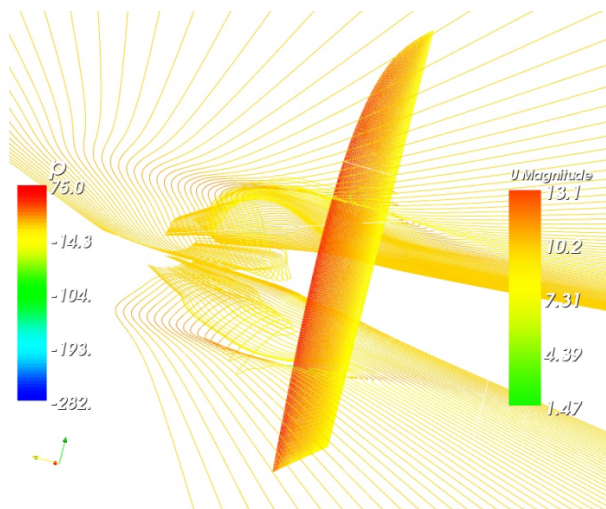


Figura 5.6: Líneas de corriente con modelo $k - \epsilon$ a una altura de 5 y 10 metros

5.4.1.3. Large Eddy Simulation

Una alternativa a la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes incompresibles y a los modelos de turbulencia, como el $k - \epsilon$ descrito en el apartado anterior, son los

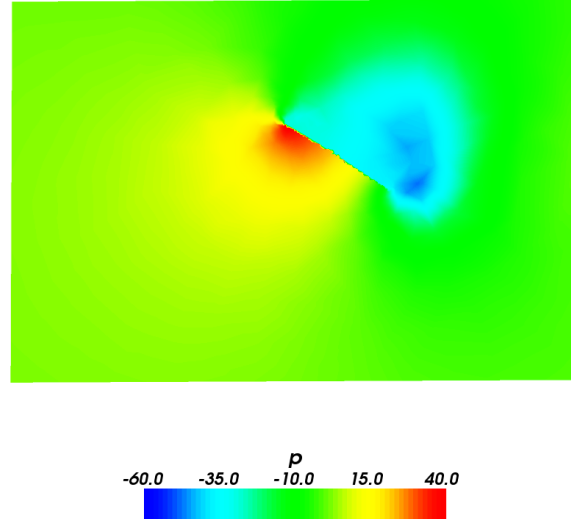


Figura 5.7: Representación de la presión en $z=10\text{ m}$

métodos LES, que incorporan la resolución completa del flujo para las mayores escalas de turbulencia e introducen un modelo para las más pequeñas. Esto se justifica porque estas últimas escalas no están asociadas a fenómenos de transporte importantes y son más isotropas.

La ventaja de estos métodos es que requieren un menor coste computacional proporcionando el mismo nivel de información RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations), que usando mallas mucho más finas. Además, mientras los métodos RANS sólo proporcionan resultados promediadas, los LES son capaces de predecir características de flujo instantáneas y resolver estructuras de flujo turbulentas.

Los métodos LES incorporan un filtro con el fin de eliminar las fluctuaciones que introducen las escalas más pequeñas. Se pueden utilizar distintos tipos; el más sencillo sería el cálculo de la media en el volumen de la celda de filtrado [43]:

$$\overline{\Phi}(\mathbf{P}, t) = \frac{1}{\Delta^3} \int_{x-\frac{1}{2}\Delta x}^{x+\frac{1}{2}\Delta x} \int_{y-\frac{1}{2}\Delta y}^{y+\frac{1}{2}\Delta y} \int_{z-\frac{1}{2}\Delta z}^{z+\frac{1}{2}\Delta z} \Phi(\xi, \eta, \zeta, t) d\xi d\eta d\zeta \quad (5.13)$$

donde $\mathbf{P} = \{x, y, z\}$, Δ es la longitud característica del filtrado, $\Delta = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{\frac{1}{3}}$, que se tomará superior al tamaño de la malla. El valor de $\overline{\Phi}$ representa el valor de la magnitud

Φ filtrada y la perturbación, Φ' vendrá dada por

$$\Phi' = \Phi - \bar{\Phi}, \quad (5.14)$$

que depende de Δ . Es muy habitual utilizar otra posibilidad que consiste en incorporar un núcleo de convolución $G(\mathbf{Q}, \Delta)$:

$$\bar{\Phi}(\mathbf{P}, t) = \int_{|\mathbf{P}_1 - \mathbf{Q}_1| < \Delta x} \int_{|\mathbf{P}_2 - \mathbf{Q}_2| < \Delta y} \int_{|\mathbf{P}_3 - \mathbf{Q}_3| < \Delta z} G(\mathbf{P} - \mathbf{Q}, \Delta) \Phi(\mathbf{Q}, t) d\mathbf{Q} \quad (5.15)$$

la media correspondería a

$$G(\mathbf{P} - \mathbf{Q}, \Delta) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^3} & \text{si } \|\mathbf{P}_i - \mathbf{Q}_i\| \leq \frac{\Delta x_i}{2} \\ 0 & \text{si } \|\mathbf{P}_i - \mathbf{Q}_i\| > \frac{\Delta x_i}{2} \end{cases} \quad (5.16)$$

aunque los más frecuentemente utilizados son los modelos gaussianos [118]:

$$G(\mathbf{P} - \mathbf{Q}, \Delta) = \left(\frac{6}{\pi \Delta^2} \right) \exp \left(-6 \frac{\|\mathbf{P} - \mathbf{Q}\|^2}{\Delta^2} \right) \quad (5.17)$$

lo que garantiza la estabilidad numérica del esquema.

Este modelo se ha utilizado en estas pruebas para comparar los resultados con un procedimiento de un mayor coste computacional y, con las consideraciones adecuadas, proporcionar resultados más realistas. Es necesario destacar que, debido al carácter no estacionario de este modelo, se ha considerado una situación cuando los torbellinos se han desarrollado totalmente.

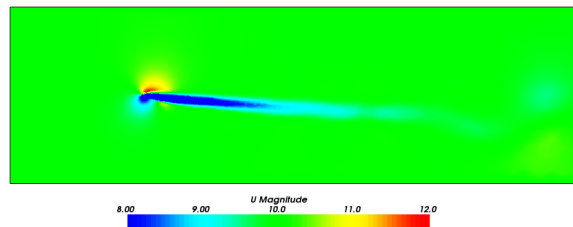


Figura 5.8: Mapa de velocidad a 3m

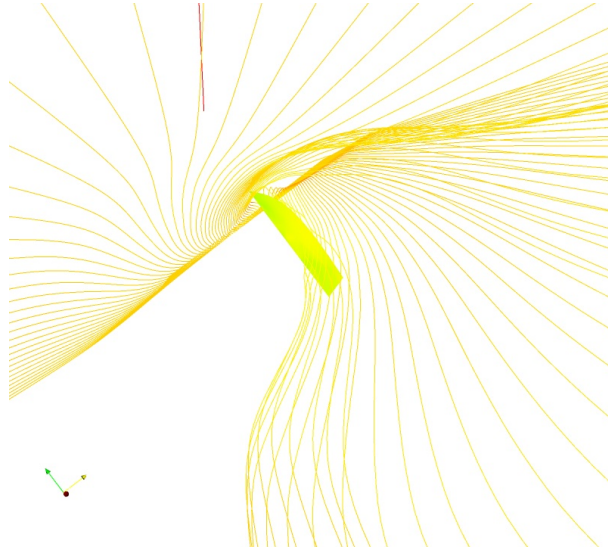


Figura 5.9: Líneas de corriente velocidad en $z=12\text{ m}$

5.4.1.4. Comparación de los distintos modelos

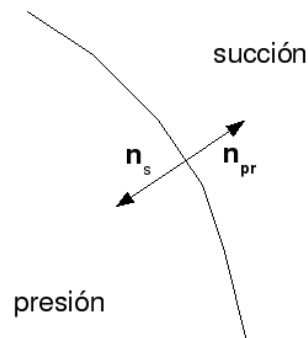
Se ha realizado una comparación de los tres modelos sobre la resultante de las fuerzas generadas por el aire en la superficie de la vela, calculada como:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} = \int_{\Gamma_{sail}} (-pI + \tau) \mathbf{n} ds &= \int_{\Gamma_s} (-pI + \tau)_s \mathbf{n}_s ds + \int_{\Gamma_{pr}} (-pI + \tau)_{pr} \mathbf{n}_{pr} ds = \\ &= \int_{\Gamma_{pr}} \left((-pI + \tau)_{pr} - (-pI + \tau)_s \right) \mathbf{n}_{pr} ds, \end{aligned} \quad (5.18)$$

donde pr indica la cara de presión y s la de succión. Por ello la resultante es la diferencia entre el valor obtenido sobre la cara de presión y la de succión (figura 5.10). En las tablas siguientes se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de las secciones anteriores.

Los tiempos de cálculo acumulado en los ocho procesadores, expresado en minutos, se refleja en la siguiente tabla:

Entre el modelo laminar y el $k - \epsilon$ se aprecia una diferencia entre el 3 y 5 % según las componentes. En el modelo laminar se observa que da una componente vertical positiva, mientras que en los modelos de turbulencia ésta es negativa; pero como su valor

**Figura 5.10:** Vector normal a la superficie de la vela**Cuadro 5.1:** Resultado del flujo laminar

	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
Cara de succión	-412,5	-625,7	-2,7
Cara de presión	615,3	1385,4	12,4
Fuerza total	1027,8	2011,1	15,1

Cuadro 5.2: Resultado del flujo laminar + modelo $k - \epsilon$

	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
Cara de succión	-397,1	-599,5	20,0
Cara de presión	595,7	1319,8	-8,9
Fuerza total	992,8	1919,3	-28,9

es mucho más pequeño que el de las fuerzas en las direcciones x e y , no se considera significativa esta diferencia. Asumiendo que el modelo $k - \epsilon$ es mas preciso, para conseguir una primera aproximación se puede emplear el laminar, que proporciona unos primeros resultados adecuados con un menor coste computacional, entre un 61 % y un 43 % menos dependiendo del modo de implementación.

Finalmente señalaremos que si bien el modelo LES permite obtener resultados rea-

Cuadro 5.3: Resultado del flujo turbulento con modelo $k - \epsilon$

	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
Cara de succión	-396,2	-598,4	20,1
Cara de presión	595,1	1319,3	-9,2
Fuerza total	992,1	1918,1	-29,6

Cuadro 5.4: Resultado del flujo turbulento con modelo LES

	Fx(N)	Fy(N)	Fz(N)
Cara de succión	-386,4	-614,3	19,3
Cara de presión	599,3	1325,3	-5,9
Fuerza total	985,7	1939,6	-25,2

Cuadro 5.5: Tiempos de cálculo acumulado

Laminar	Laminar + $k - \epsilon$	$k - \epsilon$	LES
407	407 + 254	936	5986

listas de los grandes torbellinos, simulando la evolución temporal del flujo, esto se consigue con un elevado coste computacional, lo que hace que su aplicación en procesos iterativos de cálculo no sea recomendable. Sin embargo puede ser necesario utilizarlo si se quieren recoger los efectos del cabeceo y balance del barco.

5.4.2. Corrección mediante redes neuronales artificiales

El objetivo del proceso de evaluación en una estrategia evolutiva de diseño es determinar que alternativas son mejores y el valor relativo del valor de calidad entre alternativas. Por ello el resultado del simulador tiene que ser cualitativamente aceptable aunque no necesariamente tiene que ser cuantitativamente realistas.

En este estudio, la calidad de cada individuo se determina mediante el valor de las fuerzas resultantes sobre la vela. La validación experimental de los resultados del simulador ha consistido en comparar el valor real de las fuerzas y el calculado numéricamente. Debido a las simplificaciones introducidas en el simulador, el objetivo de este procedimiento de corrección es reducir el error cualitativo de los resultados numéricos.

De este modo, el procedimiento de corrección consiste en la evaluación de distintas configuraciones de la vela y la comparación de los resultados numéricos y experimentales. Para comparar estos dos valores es necesario determinar la forma real de la vela y la medición de las fuerzas actuando sobre ella.

5.4.2.1. Ensayo experimental

Para analizar la viabilidad de este procedimiento se han realizado diversos ensayos sobre un modelo V-60 en el Twist Wind Tunnel de la Yacht Research Unit de la Universidad de Auckland². Este túnel de viento presenta un bucle abierto con dos ventiladores de 3 metros de diámetro y una contracción de 15 metros de largo. El aire atraviesa un conjunto de álabes que reconstruyen el giro en el ángulo del viento aparente sobre la embarcación. El modelo se sitúa sobre una mesa giratoria que permite modificar el rumbo, adicionalmente el soporte del modelo permite modificar la escora del velero [119].

El giro que se produce en la estructura del viento aparente que recibe la embarcación se simula mediante un conjunto de álabes que modifican la dirección horizontal del viento. Estos álabes flexibles tienen su posición controlada a distintas alturas del túnel, de tal forma que, para cada rumbo analizado, pueda ajustarse la desviación que se introduce en el flujo, figura 5.11.

5.4.2.2. Análisis de la forma de la vela

Para la definición de la forma de la vela se ha desarrollado un sistema de medida láser. Para poder comparar las distintas configuraciones de las velas se ha requerido

²<http://www.mech.auckland.ac.nz/YRU/index.html>



Figura 5.11: *Twist tunnel de la YRU*

una definición paramétrica de su forma. Tal y como se ha indicado anteriormente, en este trabajo se ha optado por la utilización de superficies NURBS para la realización de esta representación.

El procedimiento desarrollado genera la superficie de la vela en dos etapas:

- Partiendo de la nube de puntos, mediante un proceso de filtrado y suavizado se generan 50 líneas sobre la superficie.
- La posición de los puntos de control de la superficie es modificada a través de un método de descenso de gradiente, de tal forma que se minimice el error cuadrático medio de la distancia entre la superficie y las curvas de referencia.

El modelo de red neuronal artificial usada en este ejemplo es una perceptrón mul-

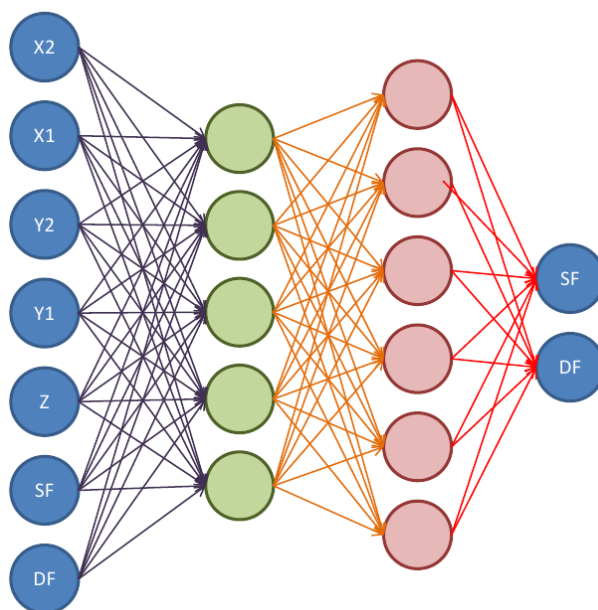


Figura 5.12: Estructura de la ANN

ticapa [120], véase 3.3.1.2. El modelo utilizado es estructura en tres capas: un capa de entradas, una capa oculta y una de capa salida.

5.4.2.3. Ensayos

Las entradas de la red neuronal artificial son las salidas del proceso de simulación y los parámetros de forma de las velas. Para desarrollar este procedimiento de corrección se han considerado diez casos diferentes. La estructura de la red utilizada es 7 neuronas de entrada (los valores de entrada de la red neuronal son cinco parámetros a_i que definen la forma de la vela y las fuerzas laterales y avante calculadas), dos capas ocultas con seis neuronas cada una y dos neuronas de salida (fuerza avante y lateral).

Para realizar la corrección mediante la red neuronal, los resultados experimentales se han dividido en dos grupos: uno de entrenamiento (cuatro muestras) y uno de test (cinco muestras). En este caso el proceso de entrenamiento se ha realizado mediante un procedimiento de retropropagación con un factor de relajación de 0,3 y un criterio de parada en el error relativo de 0,05 %, ver figura 5.13.

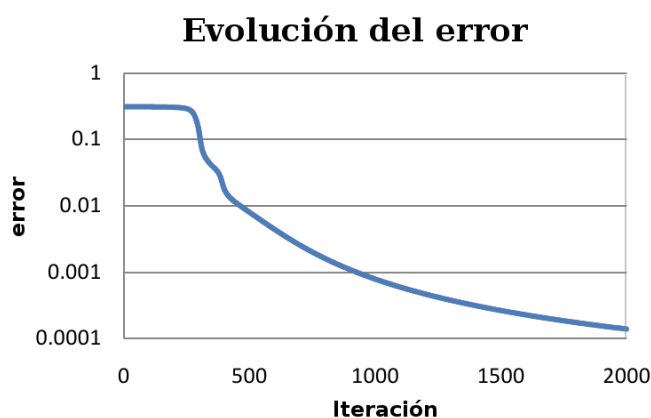


Figura 5.13: *Evolución del error de la ANN durante el proceso de entrenamiento*

Las gráficas 5.14 muestran los resultados de la corrección de la red neuronal artificial. El máximo error en los casos test es 1.2 % y el error medio es 0.23 %. El uso de esta corrección reduce el error medio desde 11.54 % hasta 0.23 %. De este modo permiten obtener resultados realistas sin incluir el casco y el mástil en el simulador y usando un modelo numérico de bajo coste computacional. La principal ventaja que introduce este método es que el coste computacional de esta mejora es despreciable frente al de utilizar un simulador que proporcione resultados similares.

5.5. Optimización de las velas de la clase tornado

El proceso de optimización se ha particularizado para un problema de optimización de las velas para la clase tornado. La fase de decisión se realiza mediante un simulador aerodinámico. El solver utilizado en este módulo es el simulador de volúmenes finitos para las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas desarrollado por Karalit³.

La utilización de este simulador está motivada, entre otros factores, por la validación experimental que se dispone de los resultados numéricos obtenidos. Así, en la figura 5.15 se muestran la comparación de estos valores realizada por G. Delussu [121],

³<http://www.karal.it>

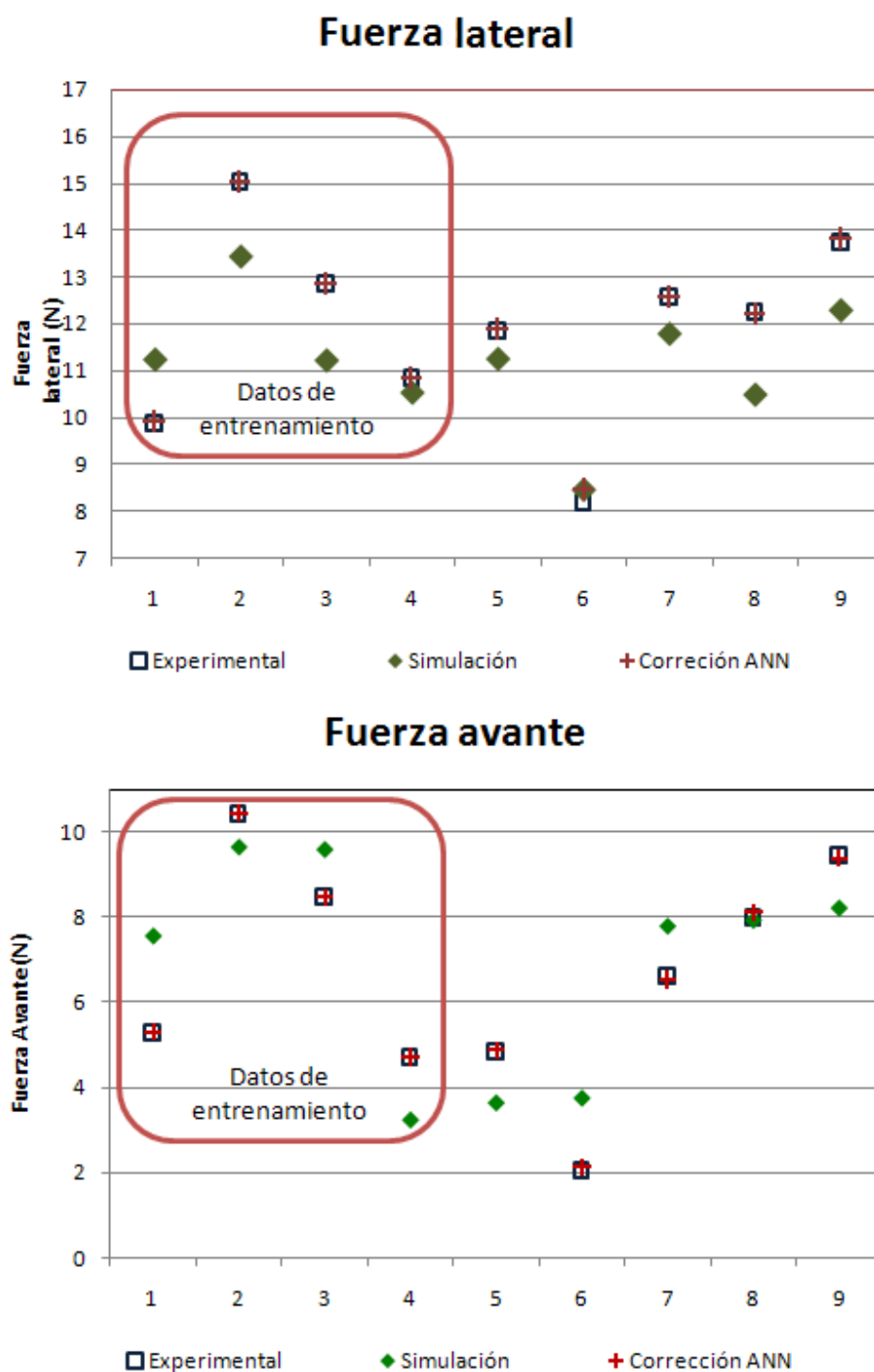


Figura 5.14: Resultados de la ANN para las fuerza lateral y avante

en ellas se refleja la buena correlación entre los coeficientes de fuerza avante y lateral para el caso estudiado. Esta validación ha permitido definir el conjunto de parámetros

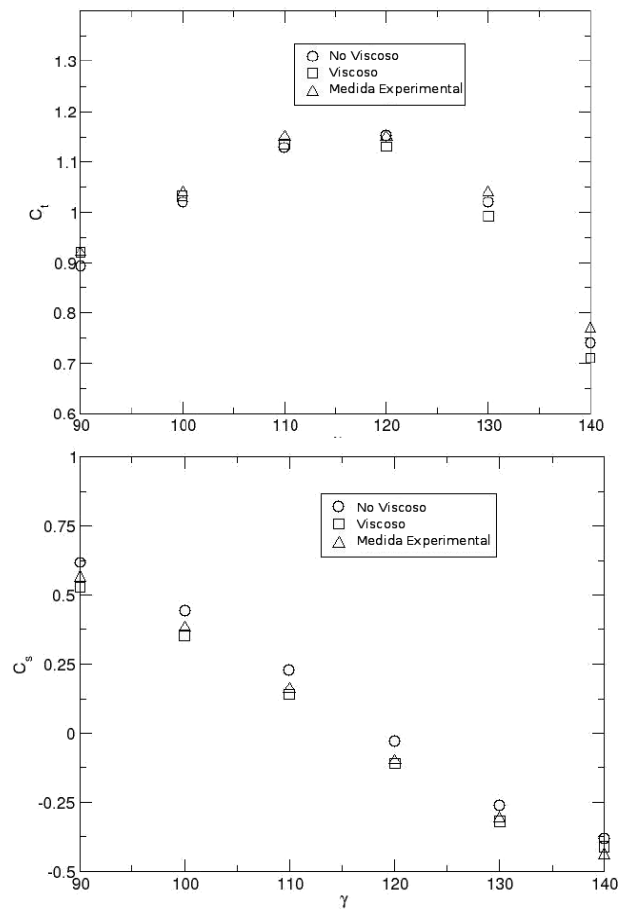


Figura 5.15: Comparación de los coeficientes de fuerza avante y fuerza lateral obtenidos mediante simulación y experimentalmente en función del ángulo de viento aparente, λ . Fuente: *Simulazione al computer delle andature portanti e di bolina* de G. Delussu, M. Mulas y M. Talice [121]

del simulador más adecuado para conseguir valores realistas y, con ello, permitir que el óptimo real del problema.

Una de las ventajas de este simulador para este problema es que permite el uso de los métodos de inmersión de superficie. Mediante este método, una de las principales dificultades de este problema de simulación, la generación de la malla, desaparece. Las velas son fronteras interiores del dominio fluido, por ello, los procedimientos convencionales requieren la generación de una nueva malla en la proximidad de la vela o la deformación de una malla previamente desarrollado para adaptarla a la nueva forma.

El uso de estas técnicas implican un alto coste computacional y, normalmente, hace decrecer la calidad de la malla.

El simulador utilizado en estas pruebas ha sido diseñado para ser utilizado en un problema genérico de mecánica de fluidos. Sin embargo las características del problema, que se han analizado en el apartado anterior, hacen posible introducir ciertas simplificaciones que reducen el coste computacional de cada evaluación sin que esto afecte significativamente a la calidad de los resultados. Las siguientes simplificaciones han sido introducidas en el solver:

- No se considera la ecuación de la energía.
- No se considera ningún modelo de turbulencia.
- No se considera las fuerzas viscosas.

Uno de los parámetros fundamentales que determina la calidad de los resultados es el tamaño de malla utilizado, teniendo en cuenta que el valor del coste computacional depende cúbicamente de este valor. Este método es especialmente importante en el caso de la utilización del método de la inmersión de superficie, ya que no sólo determina el tamaño mínimo de las estructuras fluidas que el sistema es capaz de capturar sino que, además, hay que considerar que la forma de frontera viene dada por la intersección de la vela con las celdas y, por ello, este tamaño determinará los cambios mas pequeños en la forma de la vela que podremos capturar en el sistema.

5.5.1. Proceso de decodificación

En el proceso de optimización se consideran un gran número de alternativas, sin embargo cada uno de sus bloques utiliza una representación distinta de las alternativas. El bloque de búsqueda usa una representación paramétrica del individuo, el cromosoma, mientras que en la etapa de decisión / simulación se utiliza una representación tridimensional de la superficie. Esto hace necesario, como se ha detallado en capítulos anteriores, la introducción de un bloque de decodificación que permita la comunicación entre los dos bloques anteriores. Para facilitar la definición y control de las velas

se han utilizado superficies *Non Uniform Rational B-Splines* (NURBS). La forma de estas superficies está dada por un conjunto de puntos de control, que, excepto los situados en el borde, no forman parte de la superficie. Estos puntos de control actúan como atractores de la superficie, de tal modo que permiten fácilmente controlar la forma y concavidad mediante el cambio de la posición y peso de los mismos.

Mediante este procedimiento, el número de parámetros usados para definir la forma de la superficie pueden adaptarse fácilmente a las características de cada experimento. Estos parámetros definen la posición y el peso de cada punto control, bien sea directamente o mediante la introducción de una ecuación que los relacione. Puesto que dimensiones como área de la vela y las longitudes de las cuerdas no se pueden controlar directamente, para introducir las restricciones dadas por las normas de la clase se ha incorporado un análisis de las mismas previo a la simulación para introducir estas restricciones.

5.5.1.1. Definición de los parámetros

La primera etapa para desarrollar este entorno de diseño aplicado a la optimización de velas es determinar los principales parámetros que serán utilizados para definirlo. Estos parámetros pueden clasificarse en dos grupos: los referidos al algoritmo macro-evolutivo utilizado y los relativos a la forma de vela.

El primer grupo de parámetros lo conforman el número de razas, la población y el número de generaciones. La elección del valor de estos parámetros está condicionada por dos factores: los recursos computacionales disponibles y la necesidad de realizar una exploración eficiente del espacio de búsqueda. Los condicionantes computacionales vienen dados por las características del clúster del CRS4⁴ donde se han desarrollado las pruebas. Las limitaciones de la cola disponible es de 32 procesadores y dos días de procesado, lo que hace que el producto de individuos y generaciones esté limitado a 7000, lo que lleva a poder analizar, aproximadamente, unas 1500 alternativas diferentes.

Las velas seleccionadas para ser optimizadas en estos experimentos pertenecen a la

⁴Center for Advanced Studies, Research and Development in Sardinia

clase Tornado debido a la existencia de estudios previos en el CRS4 utilizables como modelos de referencia. De este modo, las reglas internacionales de la clase Tornado han sido utilizado para definir las constantes del proceso de optimización de la vela. Estas reglas proporcionan restricciones sobre los valores límite al tamaño de la vela así como la posición relativa entre la vela y el foque. Estos valores límite se definen valores máximos de las longitudes en la vela a distintas alturas. Así, antes del análisis aerodinámico, se calculan estos valores y si alguna de las restricciones no se cumple, la vela se rechaza.

Para definir la vela mayor se han utilizado ocho parámetros:

- Posición de la máxima deformación y su valor.
- Posición y valor de la máxima deformación en el tope de la vela.
- Desplazamiento del borde de salida en el tope de la vela.
- Desplazamiento del pujamen.
- Línea de máxima deformación de la vela.

Para definir el foque se han utilizado cinco parámetros:

- Punto de desplazamiento máximo y su posición.
- Desplazamiento del borde de salida.
- Línea de máxima deformación.

Adicionalmente, para aumentar el rango de alternativas a analizar se ha utilizado una definición parabólica de los pesos y para la posición horizontal de los puntos de control

5.5.2. Corrección del simulador

Para la aplicación del procedimiento descrito en el apartado 5.4.2.2 al caso analizado, se ha adaptado para su uso en el túnel de viento de circuito cerrado del Grupo Integrado de Ingeniería de la Universidade da Coruña.

Este túnel de viento tiene una sección abierta de pruebas 1,1 m x 0,8 m, la velocidad del viento puede ajustarse en el rango de 5 a 45 m/s, el nivel de turbulencia es inferior al 1 % y el valor máximo de la no uniformidad de la velocidad axial es de 2 %. La vela se apoya en una balanza de ses componentes, tres fuerzas y tres momentos, y una galga extensiométrica adicional.

5.5.2.1. Análisis de la forma de la vela

El primer paso de este proceso de validación es determinar la verdadera forma de la vela. La forma de la vela debe ser medida en cada condición de viento ya que debe recogerse la deformación sufrida. El proceso de medición debe ser ajeno a la vela para evitar perturbaciones en el flujo circundante. En este caso se ha optado por un sistema basado en visión estereoscópica para la captura de la forma de la vela. La principal ventaja que presenta este método es que la permite captar la forma de la vela en un instante dado, determinado por la velocidad de obturación de la cámara, frente al sistema láser que involucra segundos de medición. El proceso seguido puede dividirse en las siguientes etapas:

- **Marcado de la vela.** Se ha marcado una red de puntos sobre la vela con el fin de facilitar el reconocimiento automático de la superficie.
- **Fotografía.** Simultáneamente se toman fotografías desde diferentes ángulos. En el caso presentado se han utilizado tres fotografías.
- **Reconocimiento de puntos.** Se reconocen las marcas en la vela en cada una de las imágenes para generar una red tridimensional.
- **Definición de la superficie.** A través de un método de mínimos cuadrados se ha adecuado la forma de la superficie a los puntos de la red. Con el objeto de aumentar la velocidad de este proceso se han establecido una serie de restricciones, la posición del mástil y de la botavara y una consideración de conservación del signo de la convexidad.

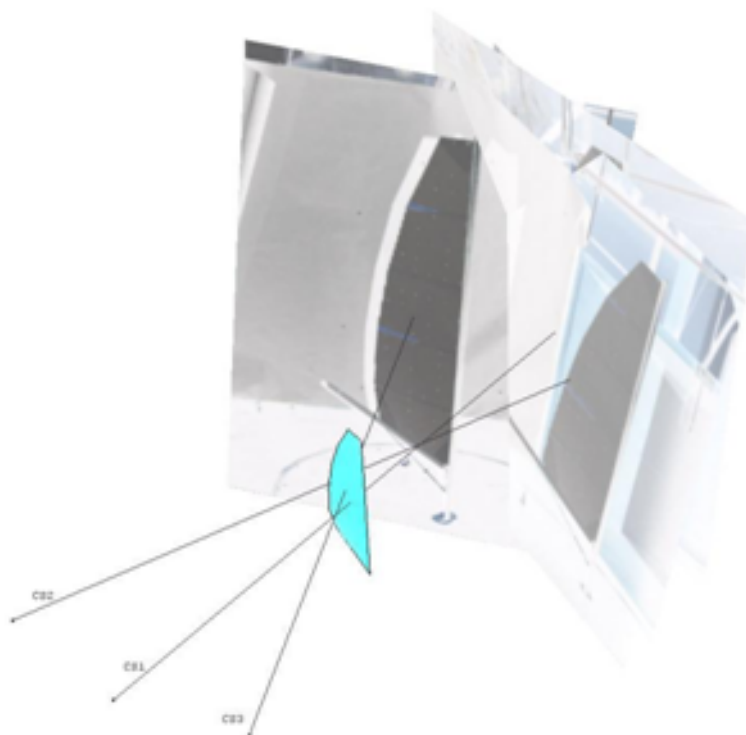


Figura 5.16: *Modelo 3D generado*

5.5.2.2. Análisis de las fuerzas

La posición de la vela está determinada por el mástil y la botavara. La conexión entre el mástil y la plataforma que lo soporta se realiza a través de un transductor que proporciona las fuerzas y momentos en cada eje. La posición de la botavara se determina al conocer la longitud de la escota que lo fija, ya que el otro extremo está fijo en un rótula esférica sobre el mástil. Mediante las técnicas fotogramétricas se obtiene el vector director de la escota y con una célula de carga se mide su tensión(T). Este vector director se define como

$$s = (\cos(\alpha), \cos(\beta), \cos(\gamma)) \quad (5.19)$$

donde α es el ángulo que forma con el eje X, β es el ángulo con el eje Y y γ es el ángulo con el eje Z.

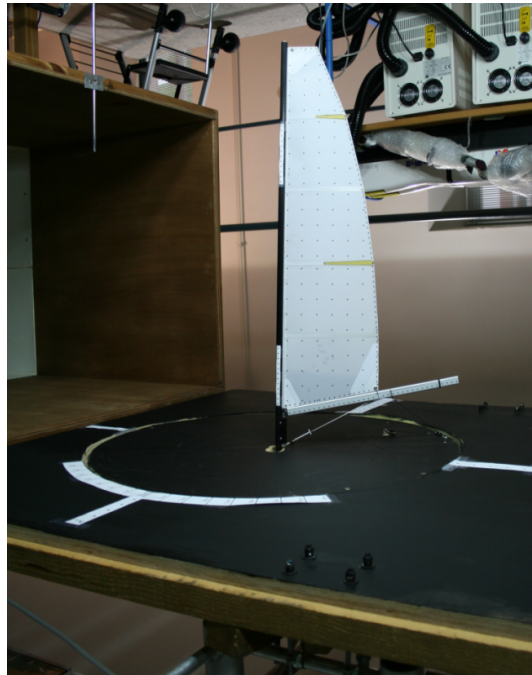


Figura 5.17: Túnel de viento del Grupo Integrado de Ingeniería

Determinada la posición del mástil, la botavara y la dirección de la escota, la fuerza total se puede evaluar como:

$$R_x = F_x + T \cdot \cos(\alpha) \quad (5.20)$$

$$R_y = F_y + T \cdot \cos(\beta) \quad (5.21)$$

$$R_z = F_z + T \cdot \cos(\gamma) \quad (5.22)$$

5.5.2.3. Integración de los resultados experimentales y computacionales

El proceso de validación se realiza por medio de una serie sistemática de las medidas realizadas a distintos rumbos y ángulos de la botavara. Para cada combinación de rumbo y posición de la botavara se ha realizado la simulación numérica de la misma situación. Permitiendo, con los valores obtenidos, entrenar la red neuronal planteada.

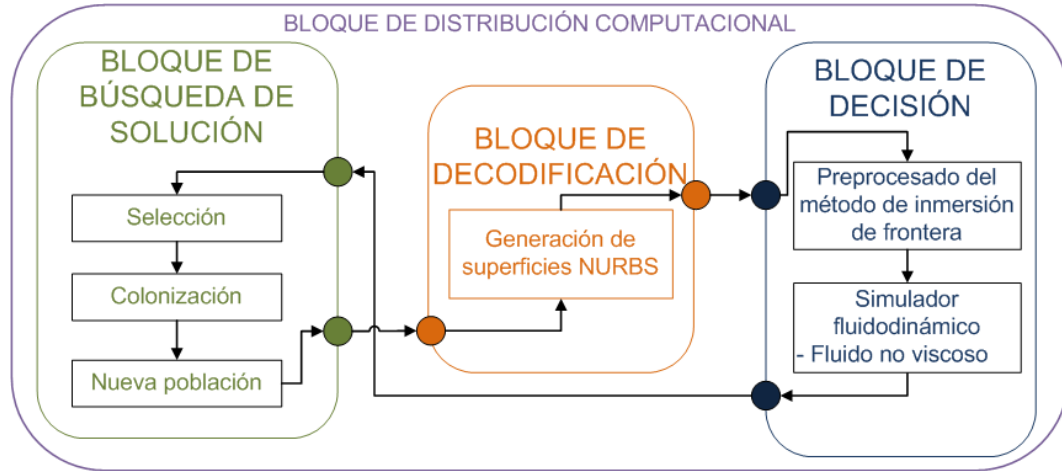


Figura 5.18: Configuración del entorno de diseño aplicado al problema de diseño de velas

5.5.3. Optimización de la vela mayor

La primera prueba realizada ha sido la optimización de la vela mayor, en este proceso la función de calidad se ha definido como:

$$f_i = F_{fw} - 0,1F_{tr} \quad (5.23)$$

donde F_{fw} es la fuerza en la dirección de avance del velero y F_{tr} es la fuerza transversal.

En el caso propuesto se ha considerado un viento aparente de 60° y formando la botavara un ángulo de 30° respecto a crujía.

Los parámetros del algoritmo macroevolutivo utilizados han sido:

- Población: 64
- Generaciones: 50
- Migración local: 25 generaciones

- Migración global: 40 generaciones

- $\tau = \frac{Total_{generaciones} - 0,9generation_{actual}}{Total_{generaciones}}$

Los resultados obtenidos en este experimento se presentan en las gráficas 5.19, donde se muestra la evolución de los valores de la calidad en el proceso evolutivo.

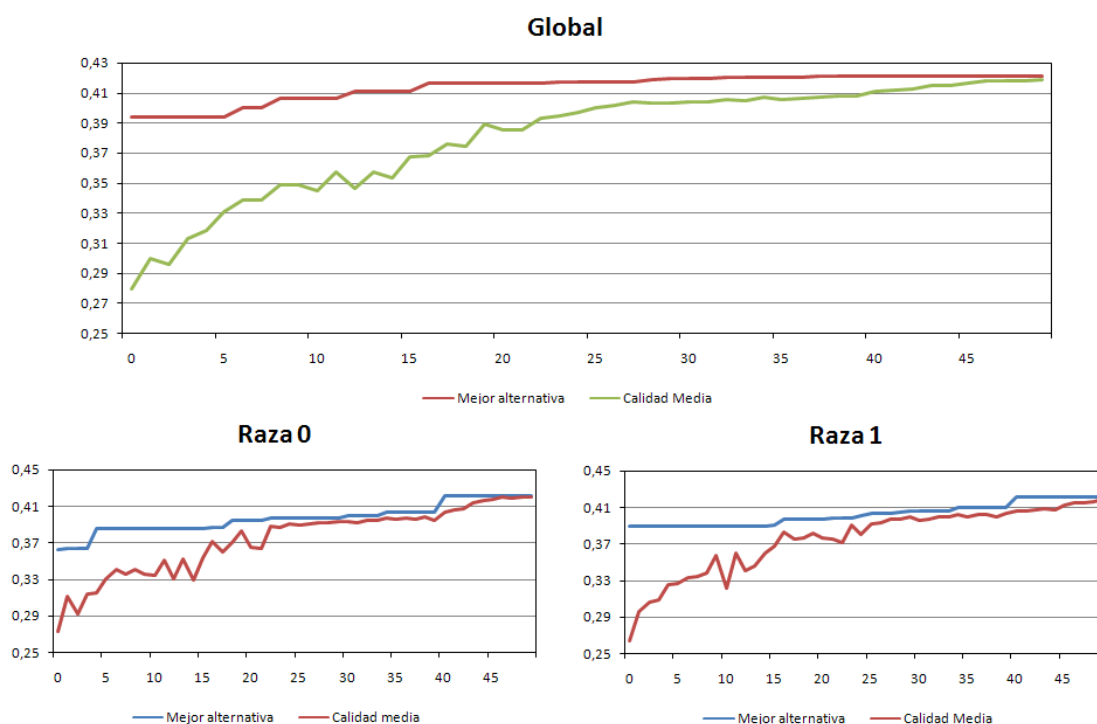


Figura 5.19: Evolución de la calidad en el proceso evolutivo

Los resultados obtenidos mediante este procedimiento se han comparado con el modelo de referencia detectándose una gran diferencia. Es necesario destacar que esta importante diferencia es debido a que el el modelo de referencia está diseñado para operar con el foque aguas arriba y, por tanto, con un ángulo de ataque menor sobre la vela mayor. Por este motivo cuando se optimiza el diseño sin considerar la presencia del foque el punto de diseño es muy distinto y, por tanto, la configuración y resultantos obtenidos también.

Modelo de referencia

Mejor alternativa

Coeficientes de fuerza

Coeficientes de fuerza

C_x	C_y
-0.04976	-0.22754
-0.32885	-0.64878

C_x	C_y
-0.00559	-0.02513
-0.39885	-0.82401

■ $F_{fw} = 0,2$

■ $F_{fw} = 0,4$

■ $F_{tr} = 0,4$

■ $F_{tr} = 0,7$

■ **Calidad=0.18**

■ **Calidad=0.4212**

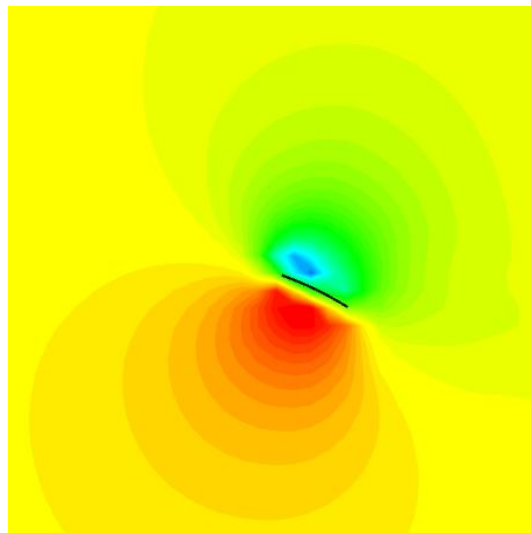


Figura 5.20: Campo de presiones a 5 metros

5.5.4. Optimización conjunta de mayor y foque

Mediante el experimento anterior se analizó el comportamiento del sistema de simulación con el objetivo de determinar las mejores relaciones de calidad / coste computacional. Estos parámetros son:

- Tamaño de malla.
- Número de iteraciones.
- algoritmo de interpolación del simulador numérico

De todos estos el parámetro más importante es el tamaño de malla ya que condiciona directamente el coste computacional del problema, al crecer con el cubo de este valor. Para definir este elemento se ha optado por definirla a través del elemento más pequeño que se requiere capturar; en este caso la mitad de la mínima separación entre el foque y la vela mayor, 8 centímetros. Así el dominio es discretizado en once bloques que crecen en torno al bloque principal, doblando el tamaño del elemento en cada etapa. De este modo, el bloque inicial tiene un tamaño de 4.8 x 1.6 x 9.6 metros, con 144000 celdas y el tamaño final del dominio resulta de 660 x 660 x 337 metros.

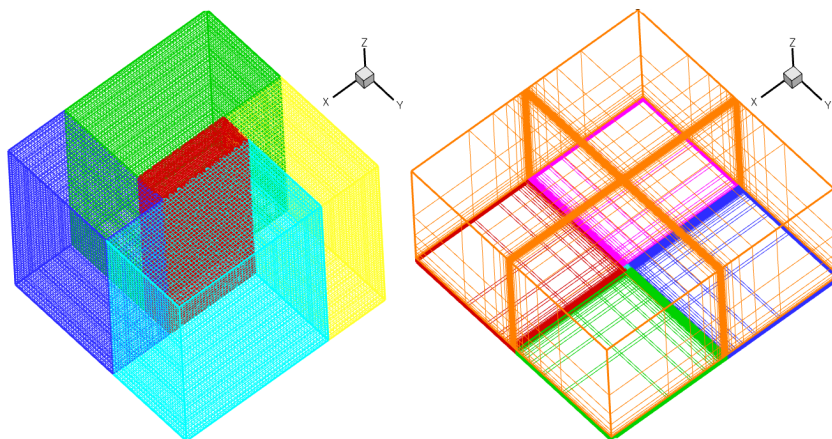


Figura 5.21: *Bloque principal y dominio completo de simulación*

Para evaluar el efecto de los parámetros del algoritmo macroevolutivo se han estudiado dos situaciones con el mismo valor del producto individuos x generaciones; uno con 64 individuos y 150 generaciones y otro con 128 individuos y 75 generaciones.

Las gráficas 5.22 y 5.23 muestran la evolución del valor de la calidad, las brascas caídas en la calidad media están asociadas a los procesos de migración entre razas. El valor medio del número de evaluaciones es de 6614, de las cuales sólo 1652, el 24 %, cumple con todas las restricciones. El mayor porcentaje de estos individuos no válidos se concentra en las primeras etapas del proceso evolutivo, donde gran parte de

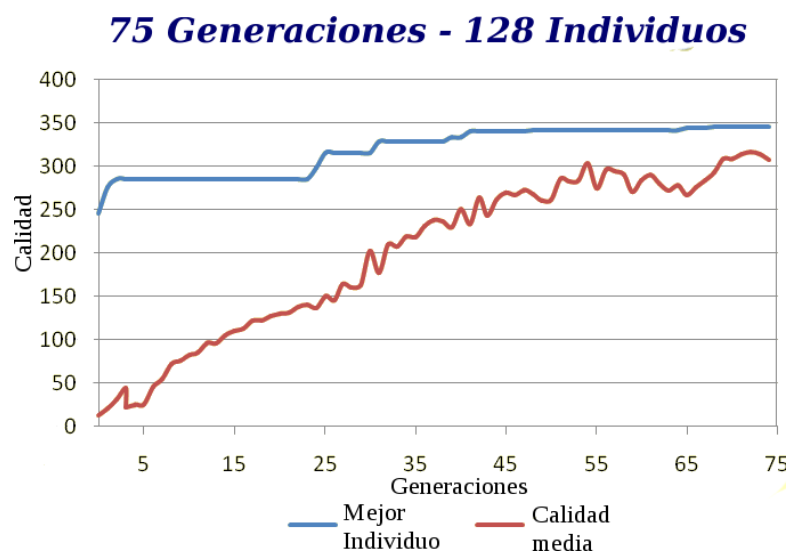


Figura 5.22: Evolución de la calidad para 128 individuos y 75 generaciones

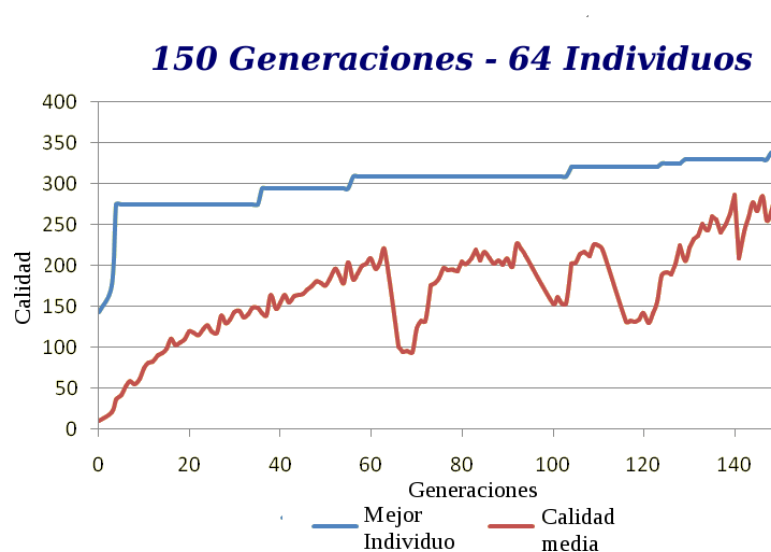


Figura 5.23: Evolución de la calidad para 64 individuos y 150 generaciones

las alternativas son creadas aleatoriamente. Pero al ir incrementándose la explotación de los resultados, este valor disminuye significativamente hasta hacerse prácticamente nulo en las últimas generaciones.

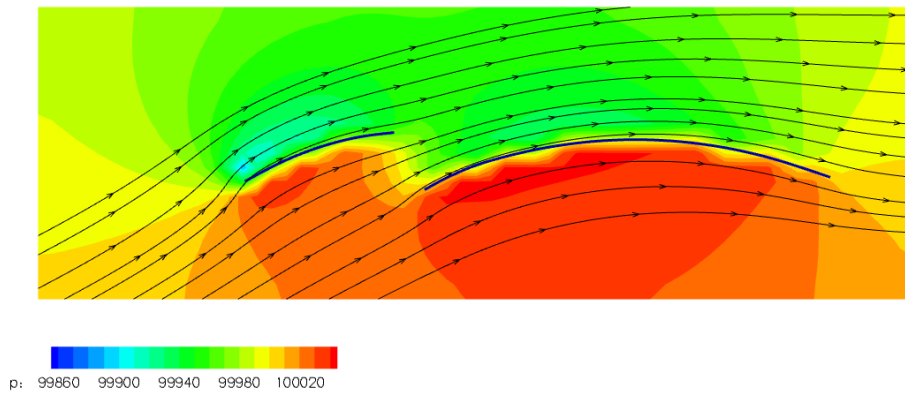


Figura 5.24: Campo de presiones y líneas de corriente de la mejor alternativa a 3 metros

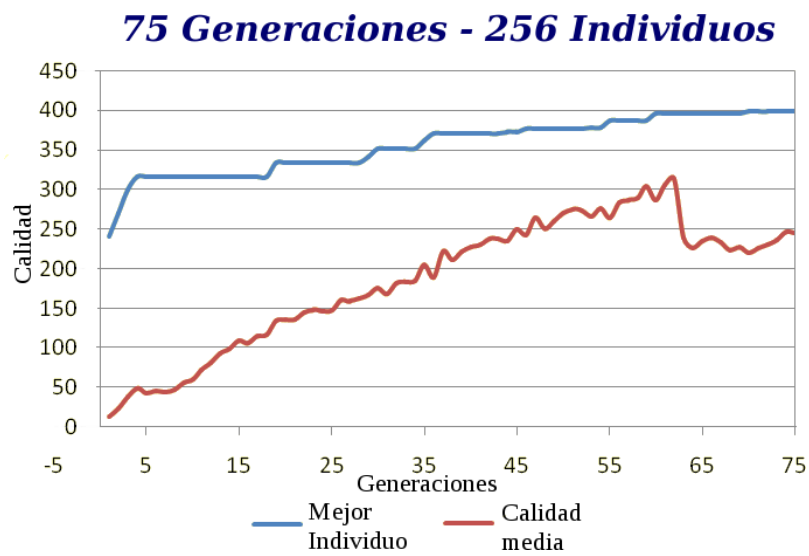


Figura 5.25: Ensayo con 256 individuos

Para permitir una mejor exploración del espacio de búsqueda y teniendo en cuenta el elevado porcentaje de individuos no válidos encontrados se ha realizado un test adicional doblando la población. El mejor individuo, figura 5.26 de esta prueba alcanzo un valor de calidad, la fuerza avante, de 399.2 newtons, este valor es 4.78 % mayor que el valor de la del modelo de referencia.

5.6. Conclusiones al proceso de optimización del velas

Las pruebas realizadas presentan un proceso de diseño automático para el diseño óptimo de velas de competición. En este proceso se han combinado técnicas evolutivas con procesos de simulación numérica. A través de este experimento se ha validado la capacidad de la estructura propuesta para abordar problemas reales de optimización aerodinámica. La flexibilidad del sistema ha permitido abordar este problema no sólo considerando la integración del simulador, sino que también a permito introducir sistemas de corrección y mejora, en este caso una red neuronal entrenada con ensayos experimentales.

El simulador evalúa cada una de las alternativas mediante el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas que, combinado con un método de inmersión de frontera, que permite lograr buenos resultados con unos requisitos de cómputo relativamente bajos. Además, este simulador permite una fácil adaptación a las diferentes formas de la vela; produciéndose este proceso a través de un breve procedimiento que no afecta a la calidad de malla. Mediante este procedimiento se consigue analizar formas complejas, como es el caso de las dos velas, sin que se hayan aparecido errores derivados del uso de estas mallas.

En los ensayos realizados, teniendo en cuenta los condicionantes existentes, los resultados obtenidos se plantean cerca de los óptimos. Este procedimiento ayuda a resolver complejos y costosos modelos no lineales. Los resultados obtenidos en estas pruebas son muy precisos y se han cumplido todos los parámetros de diseño impuestas, sin tener que recurrir a muy complicados y costosos modelos no lineales dentro del proceso de cálculo.

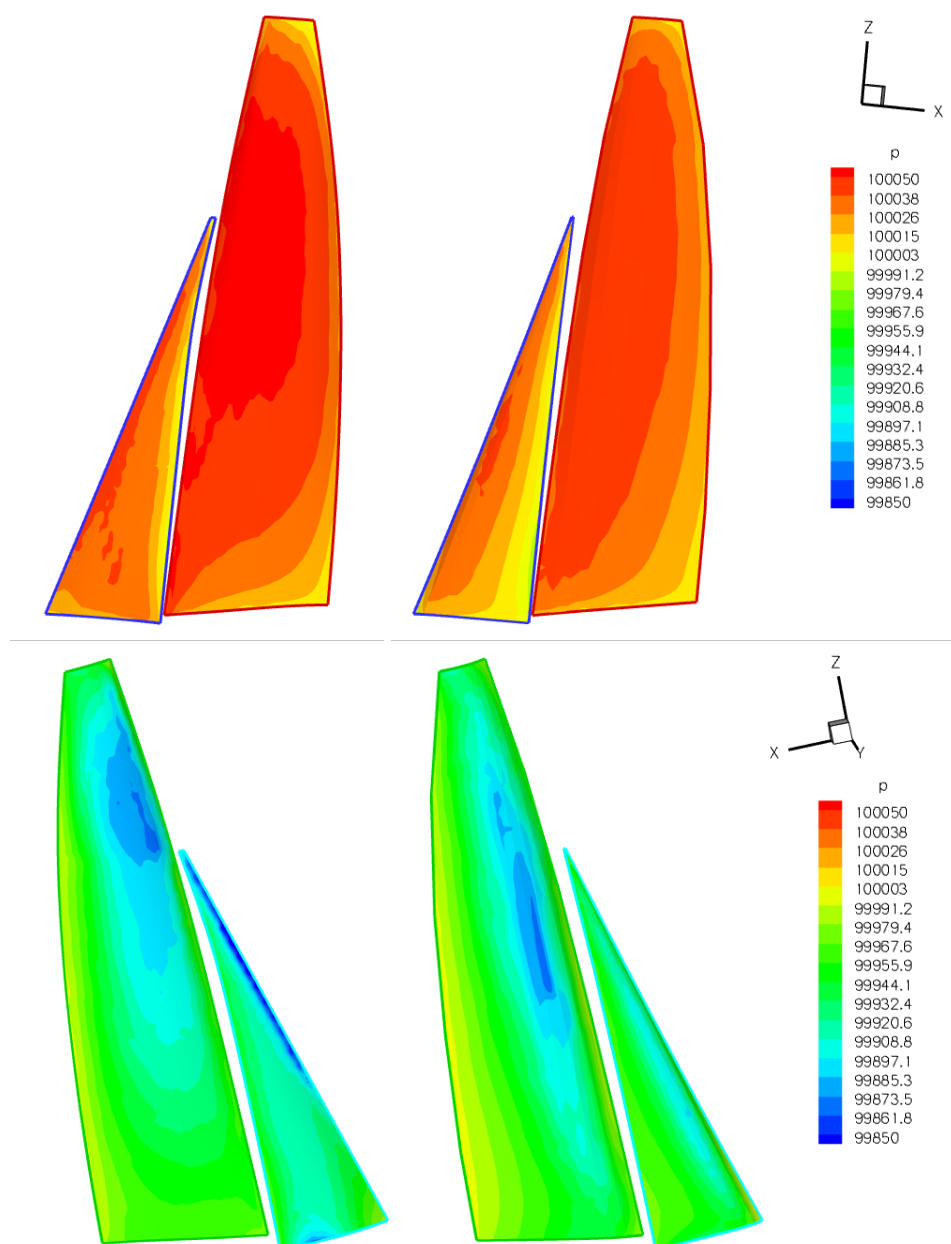


Figura 5.26: Distribución de presiones sobre la vela, a la izquierda la mejor alternativa encontrada y a la derecha el modelo de referencia

El procedimiento seguido reduce drásticamente la participación del diseñador en el proceso de búsqueda de la solución óptima, ya que este proceso es realizado de forma automática. Así, el trabajo del diseñador se centra en la definición del problema, es decir, sus características, objetivos y restricciones, es decir, aquellas tareas en las que

se requiere introducir conocimiento en el sistema.

Capítulo 6

Problemas multiobjetivo

Normalmente los procesos de diseño óptimo en problemas de ingeniería no tienen un único objetivo, sino que tienen en cuenta dos o más funciones objetivo que deben satisfacerse simultáneamente. El método tradicional para abordar este problema ha sido establecer artificialmente un único objetivo obtenido como una combinación del conjunto de los objetivos existentes o bien considerando sólo uno de las funciones objetivo y operando con el resto como restricciones del problema.

Al tener más de una función objetivo no puede obtenerse una única solución a este tipo de problema sino que se alcanza un grupo de soluciones óptimas que se denomina frente de Pareto del problema. La definición de frente de Pareto fue propuesta por Francis Ysidro en 1881, siendo en 1886 cuando Vilfredo Pareto realiza su formulación generaliza. En esta definición se denomina óptimo de Pareto a aquellas soluciones tales que tienen un valor mínimo en una función objetivo sin empeorar en otro. Para analizar matemáticamente este problema, es necesario definir el concepto de dominancia de Pareto:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = \{u_1, \dots, u_k\} \text{ domina a } \mathbf{v} = \{v_1, \dots, v_k\} &\Leftrightarrow \\ \forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i \text{ y } \exists i_0 \in \{1, \dots, k\} \mid u_{i_0} < v_{i_0}, \end{aligned} \quad (6.1)$$

siendo k el número de objetivos existente.

De este modo se determina que:

$$\begin{aligned} \text{una solución } \mathbf{x}^* \text{ es un óptimo de Pareto} &\Leftrightarrow \\ \nexists \mathbf{x} \in \Omega \setminus \mathbf{v} = f(\mathbf{x}) = (v_1, \dots, v_k) \text{ domine a } \mathbf{u} = f(\mathbf{x}^*) = (u_1, \dots, u_k), \end{aligned} \quad (6.2)$$

siendo $f : \Re^n \longrightarrow \Re^k$ la función de calidad y n la dimensionalidad del espacio de búsqueda. El conjunto de estos óptimos representado en el espacio de los valores de las funciones objetivo es lo que se denomina frente de Pareto.

La primera aplicación de los algoritmos genéticos a problemas multiobjetivos fue desarrollada por Schaffer en 1985 con su *Vector Evaluated Genetic Algorithm* [122]. A partir de este modelo inicial se han desarrollado nuevos algoritmos que se pueden clasificar en dos grupos o generaciones:

- **Primera generación**, basada en la utilización de jerarquías de Pareto, mediante la creación de frentes no dominados en una población y nichos, consistente en el cruce de individuos por función objetivo buscando la especialización de la población. Estos algoritmos pueden considerarse como las estrategias mas simples para la resolución de problemas multiobjetivo, ejemplos de estos algoritmos son VEGA [122], NSGA [123], NPGA [124] y el MOGA [125].
- **Segunda generación**, que introducen el concepto de elitismo haciendo uso de herramientas de selección entre progenitores y descendientes o mediante el uso de poblaciones secundarias. El desarrollo de estos sistemas se inicia a finales de los años 90, pudiéndose destacar algoritmos como el NSGA-II [126], NPGA2 [127], SPEA [128] y los microgenéticos [129] [130]. Debido a su mejor eficiencia computacional el el grupo que mayor aplicación está teniendo en los últimos años.

6.1. NSGA-II

Aunque existen diversos algoritmos evolutivos multiobjetivos [131] y estos están incrementando su efectividad y eficiencia en aplicaciones reales [132], las pruebas

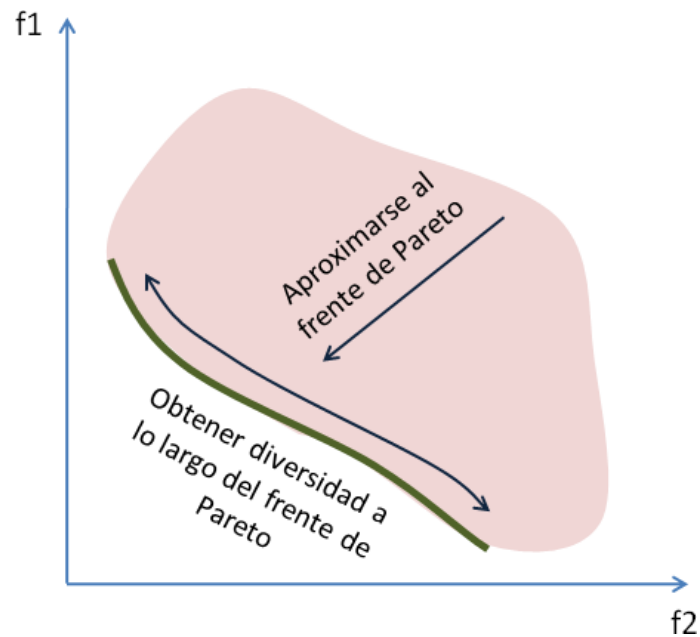


Figura 6.1: *Proceso de búsqueda del frente de Pareto*

realizadas y las referencias bibliográficas [133] parecen indicar que el NSGA-II [126] proporciona, en la mayoría de los casos, los mejores resultados en los test de optimización y en problemas reales [134]. Debido a estos resultados se ha optado por utilizar este algoritmo como base para resolver los problemas multiobjetivo. En los siguientes apartados se exponen los operadores utilizados por el NSGA-II y su estructura de cálculo.

6.1.0.1. Ordenamiento no dominado

El ordenamiento no dominado utilizado en el NSGA-II se basa en la creación de los frentes de Pareto existentes en la población. Para ello, a cada uno de los individuos se le asignan dos atributos:

- **Cuenta de dominación**, el número de individuos que dominan al individuo.
- **Conjunto de individuos dominados**, lista de todos los individuos que son dominados por el individuo considerado.

El proceso de ordenamiento se inicia a partir de la asignación de los atributos anteriores a todos los individuos de la población. Una vez establecidos estos valores se realiza un proceso iterativo para generar los distintos frentes de Pareto, uno para cada nivel de ordenación. Este proceso puede expresarse mediante el siguiente algoritmo:

1. Para cada $p \in P$
 - 1.1. $S_p = 0$ y $n_p = 0$
 - 1.2. $\forall q \in P \& p \neq q$
 - Si $p \prec q$ entonces $S_p = S_p \cup \{q\}$
 - Si $p \succ q$ entonces $n_p = n_p + 1$
 - 1.3. Si $n_p = 0$ entonces $F_1 = F_1 \cup \{p\}$
2. $i = 1$, Mientras $F_i \neq 0$
 - 2.1. $Q = 0$
 - 2.2. Para cada $p \in F_i$
 - 2.2.1. Para cada $q \in S_p$
 - $n_q = n_q - 1$
 - Si $n_q = 0 \rightarrow Q = Q \cup \{q\}$
 - 2.3. $i=i+1$
 - 2.4. $F_i = Q$

siendo P el conjunto de individuos, S_p el conjunto de soluciones dominadas por p , n_p el contador de dominancia de p , F_i es el frente de Pareto de orden i , Q , vector de los miembros de los siguientes frentes y \prec el operador de dominancia.

6.1.0.2. Preservación de la diversidad

Para mantener la diversidad en la población el NSGA-II utiliza la *crowding-distance*. Esta medida de distancia permite establecer una cuantificación de la diferencia entre las distintas alternativas, en cuanto a valores de las funciones objetivo se refiere. El

valor de la *crowding-distance* hace uso de la técnica de estimación de la densidad de individuos en torno a una alternativa.

De este modo, siendo I el conjunto de soluciones, l el número de soluciones, f_m^{max} y f_m^{min} los valores máximos y mínimos de la función de calidad m y d_i la distancia del individuo i , esta distancia puede calcularse del siguiente modo:

1. Para cada alternativa i , $d_i = 0$
2. Para cada objetivo m
 - 2.1. $I = \text{sort}(I, m)$, se ordenan las alternativas en función del valor de calidad para el objetivo m .
 - 2.2. Para $i = 2$ hasta $l - 1$

$$d_i = d_i + \frac{I(i+1).m - I(i-1).m}{f_m^{max} - f_m^{min}}$$

6.1.0.3. Ordenación de las alternativas

En el NSGA-II la ordenación de las diferentes alternativas se realiza mediante el operador de *crowded-comparison*. Este operador ordena la población orientándola hacia un óptimo de Pareto y favoreciendo la diversidad de las alternativas.

De este modo el criterio de selección prefiere a las alternativas de menor rango de dominación y, a igualdad de rango, selecciona la de mayor *crowding-distance*. Así para la realización de la ordenación se requieren dos parámetros:

- i_{rank} , que determina el frente al que pertenece el individuo.
- d_i , que es el valor de la *crowding-distance* del individuo.

6.1.0.4. Estructura del NSGA-II

Explicados los principales módulos del NSGA-II, el ciclo de cálculo del algoritmo resulta:

1. $R - t = P_t \cup Q_t$, se combina la población de padre e hijos,
2. Se realiza el ordenamiento no dominado, se obtienen los F_i frentes
3. P_{t+1} y $i = 1$
4. mientras que: $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N$, N el tamaño de la población
 - 4.1. $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$
 - 4.2. $i = i + 1$
5. Se ordena el frente F_i
6. $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i(1 : N - |P_{t+1}|)$
7. Se genera Q_t aplicando los operadores de selección, cruce y mutación sobre la población P_{t+1}
8. $t=t+1$, aumenta el contador de generaciones

El NSGA-II inicialmente genera, aleatoriamente, una población de padres P_0 , de tamaño N . A continuación, se realiza la jerarquización de Pareto sobre esta población inicial, con lo que se obtienen los distintos frentes existentes en P_0 . Tras esto, haciendo uso del operador *crowded-comparison* se realiza un proceso de selección por torneo binario, con lo que se obtiene el conjunto de soluciones sobre las que se aplicará cruce y mutación para dar lugar a la población de descendiente Q_0 , cuyo tamaño es también N . Una vez obtenida la población de descendientes, esta se une a población de padres, obteniéndose una población de tamaño $2N$, de esta forma, al fusionar las dos poblaciones se consigue incrementar el elitismo del proceso. Una vez generadas ambas poblaciones se inicia el procedimiento descrito en el esquema anterior.

6.1.0.5. Tratamiento de restricciones

Habitualmente en los procesos de diseño y optimización, los modelos o alternativas están sometidos a restricciones. Estas restricciones se integran en el interior del NSGA-II mediante la introducción de una dominancia restringida. Esta dominancia modifica

la dominancia de Pareto, de tal modo que el criterio de dominancia de la alternativa i sobre la j resulta el siguiente:

- La solución i es válida (no viola restricciones) y la j no
- Si ambas soluciones son invalidas y el valor de la suma de restricciones violadas por i es menor.
- Si las dos son válidas, se aplica el criterio de dominancia de Pareto

Con este tipo de ordenación, las soluciones válidas siempre tendrán un mejor valor de dominancia que las no validas, sin embargo estas últimas no son totalmente descartadas. De esta forma las soluciones válidas se ordenan mediante el valor de sus funciones objetivo y las no válidas mediante el número de restricciones no satisfechas.

6.2. Optimización de perfiles hidrodinámicos

La integración del sistema de optimización con los procedimientos multiobjetivo y el manejo de restricciones se ha implementado en la resolución de un problema de optimización hidrodinámica de un perfil. El ensayo realizado se ha centrado en abordar tres problemas diferentes de optimización de perfiles hidrodinámicos con la finalidad de analizar las ventajas y dificultades que suponen la incorporación de técnicas de optimización que contemplen minimizar o maximizar diversos objetivos simultáneamente:

- En primer lugar se plantea un problema bi-objetivo en el que se busca maximizar la sustentación del perfil cuando el ángulo de ataque es 5° y para -5° .
- En el siguiente caso se introduce un objetivo adicional, minimizar la resistencia al avance cuando el ángulo de ataque se hace nulo.
- El último test analizado recoge los objetivos anteriores incorporando una restricción sobre el momento máximo admisible sobre el perfil.

La secuencia de problemas planteada supone un incremento progresivo de su complejidad. Mediante la incorporación progresiva de nuevos objetivos y restricciones permite analizar su influencia sobre la forma del perfil.

6.2.1. Simulador

La estructura que se ha desarrollado para el entorno de optimización es tal que permite el intercambio entre los distintos módulos que lo conforman. Así, los cambios introducidos en uno de ellos puede incorporarse al sistema sin necesidad de una nueva implementación del conjunto del sistema. Es por ello que, para la introducción de las estrategias multiobjetivo se ha optado por la utilización del mismo simulador que para la evaluación de perfiles bidimensionales. Este simulador de flujo potencial con métodos integrales de capa límite para introducir los efectos viscosos, permite obtener resultados realistas con un bajo coste computacional.

Puesto que los objetivos y las restricciones se plantean como resultado de la evaluación de los resultados del simulador, este se ha dividido en dos fases. En una primera fase, común a todos los objetivos y restricciones, se resuelve el campo fluido en torno al perfil. De esta forma, al final de esta fase, se han obtenido los campos de presiones y velocidades en el dominio fluido. En la segunda fase, ya específica de cada objetivo y restricción, se evalúan los parámetros específicos que determinan el valor del objetivo o restricción. Si bien este cálculo dependerá del objetivo concreto a analizar, normalmente este cálculo consiste a la integración o promediado de una variable sobre una superficie de control.

6.2.2. Resultados

Los tres problemas planteados se basan en la optimización de un perfil aerodinámico. En la primera fase de resolución del problema se han analizado la influencia de los parámetros del algoritmo en el resultado final, mediante la cual se han definido el tamaño de la población y el número de generaciones mas adecuado para el problema. Para ello se ha buscado un compromiso entre diversidad de la población, calidad

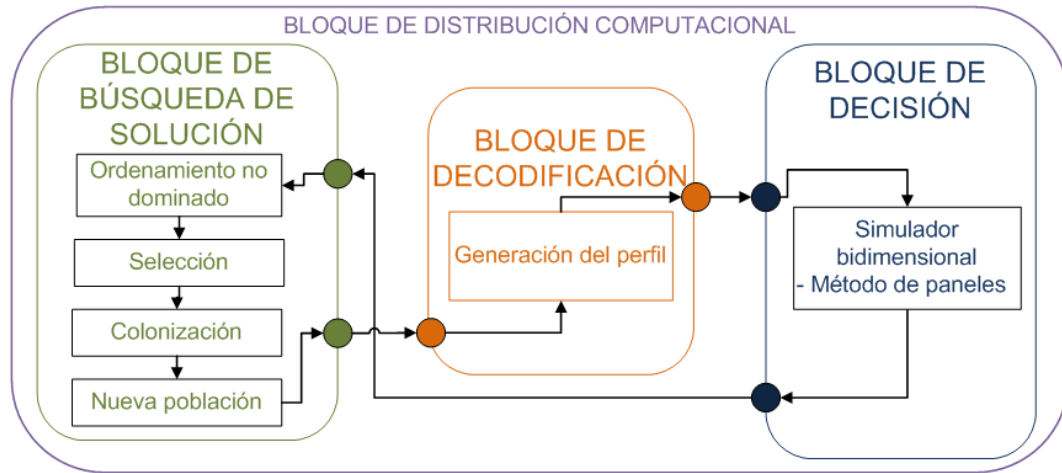


Figura 6.2: Configuración del entorno de diseño aplicado al problema multiobjetivo de perfiles

de los resultados y requerimientos de cálculo. Con el objetivo de poder comparar los resultados de los tres problemas planteados, los parámetros utilizados han sido los mismos en los tres cálculos. En este punto es necesario indicar que el coste computacional de la evaluación es idéntica en todos los casos, lo único que cambia son los resultados de la misma que se evalúan. Así, las pruebas se han realizado utilizando una población de 20 individuos y 1000 generaciones. Con estos valores, las pruebas realizadas en un procesador del cluster local *Dual-Core AMD Opteron(tm) Processor 2212*, el tiempo medio de cada una de las pruebas ha sido de 17.28 minutos, con una desviación típica de 1.43 minutos. Adicionalmente, con la finalidad de poder realizar un mejor análisis de la influencia de la introducción de restricciones en el problema, este ensayo se ha dividido en dos con diferentes restricciones al espesor del perfil.

Los diferentes test realizados se basan en la optimización de un perfil aerodinámico basado en una forma NACA de 4 dígitos modificada. En estos casos los perfiles se han definido mediante 4 parámetros:

- **Espesor**, comprendido entre el 2 % y el 36 % de la cuerda.
- **Punto de máxima deformación**, situado en la región comprendida entre el 20 % y el 80 % de la cuerda.
- **Máximo valor de la flecha en la sección media y su sentido**, comprendido

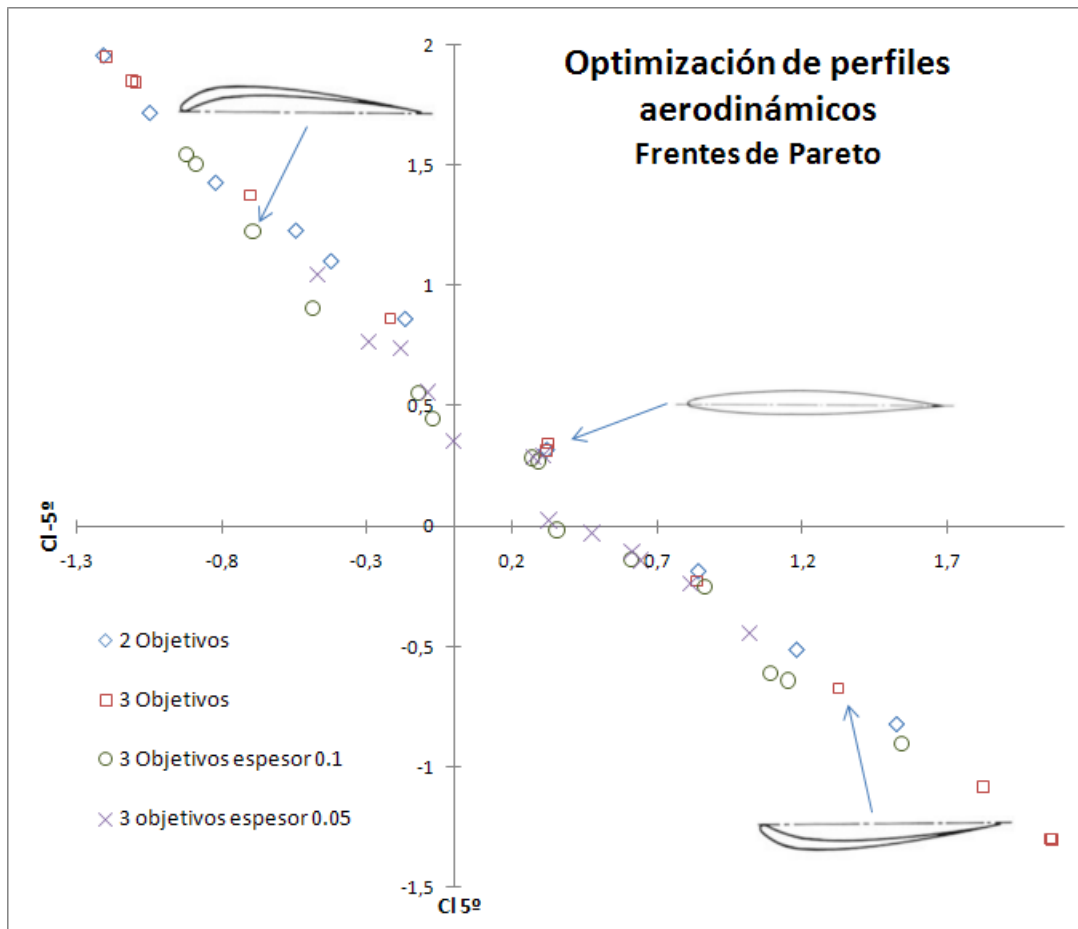


Figura 6.3: *Frentes de Pareto de las pruebas realizadas para los coeficientes de sustentación*

entre un 0 % y un 8 % de la cuerda.

- **Desplazamiento del máximo de la cuerda de espesores que define el perfil,** -10 % al 10 % de la cuerda respecto al valor original en el perfil NACA.

Se ha optado por definir un sentido en la curvatura del perfil de tal forma que el algoritmo pueda seleccionar aquellos que mejor se adaptan a los distintos ángulos de incidencia analizados. Las pruebas realizadas han seguido las siguientes especificaciones:

- **Dos objetivos,** los objetivos planteados son el coeficiente de sustentación para un ángulo de ataque a 5° y a -5° .

- **Tres objetivos**, a los objetivos anteriores se añade el coeficiente de resistencia aerodinámica para un ángulo de ataque nulo.
- **Tres objetivos y una restricción**. Al problema anterior se le introduce un requerimiento adicional sobre el espesor máximo del perfil. Se han analizado dos casos:
 - Espesor máximo 1 % de la cuerda.
 - Espesor máximo 0.5 % de la cuerda.

En la figura 6.3 se muestran los frentes de pareto para las pruebas realizadas respecto a los coeficientes de sustentación, para 5° y -5° . El requerir maximizar estos objetivos opuestos entre si hace que se hayan generado tres grupos poblacionales, uno con curvatura positiva adaptado al ángulo de ataque de 5° y con coeficientes de sustentación negativos para el ángulo de ataque negativo, un caso opuesto con curvatura negativa con valores negativos de sustentación para 5° de ángulo de ataque, y un tercer grupo de perfiles simétricos con valores moderados de sustentación para ambos ángulos. Los efectos de las restricciones sobre este problema se manifiestan como una limitación a los valores máximos del coeficiente de sustentación.

Los efectos de la minimización del coeficiente de resistencia aerodinámica con ángulo de ataque nulo se reflejan en la figura 6.4. En ella se pueden diferenciar los distintos frentes que se generan debido a la introducción de las restricciones en el espesor. Así puede verse que, al limitar el espesor del perfil, se limita la resistencia aerodinámica del mismo y, por tanto se generan frentes paralelos de menor resistencia y sustentación.

Los problemas planteados tratan de maximizar la sustentación a 5° y minimizar la resistencia cuando el ángulo de ataque es nulo. En la figura 6.5 se muestra la evolución del valor medio de la resistencia aerodinámica, en ella puede verse como el valor medio crece durante el proceso de optimización. En la figura 6.4 se muestran los efectos de la restricción sobre el espesor mínimo, en ella puede verse que cuando no se limita el espesor se alcanzan valores mayores de sustentación a costa de incrementar significativamente la resistencia al avance.

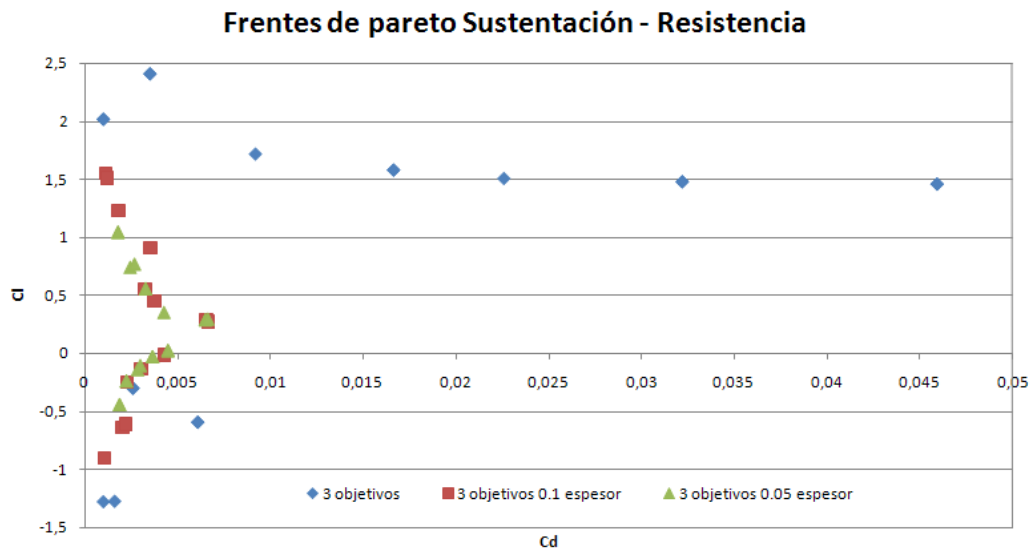


Figura 6.4: *Frentes de Pareto, comparación del coeficiente de sustentación frente al de resistencia aerodinámica*

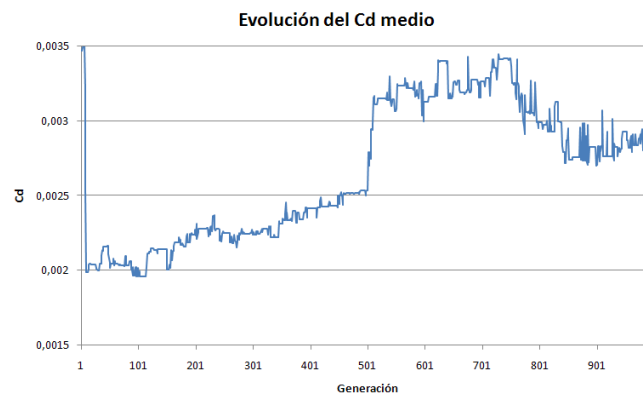


Figura 6.5: *Evolución del valor medio del coeficiente de resistencia aerodinámica*

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento del sistema frente a problemas multiobjetivo en los cuales los objetivos son antagónicos. Esto hace que al final de cada proceso de optimización no se obtenga una única solución sino que se ofrece un conjunto de soluciones de compromiso. Así, según la ponderación que en cada momento el diseñador determine para el problema podrá escoger la que más se adapte a sus necesidades.

6.3. Conclusión

El resultado obtenido mediante este procedimiento es un conjunto de soluciones con idéntica idoneidad que constituyen lo que se ha definido previamente como frente de Pareto. De este modo, el diseñador dispone de un conjunto de soluciones, y según la aplicación concreta, podrá escoger aquellas que, primando uno o varios objetivos, se adecue mas a las necesidades concretas. Esto hace que el procedimiento se presente como el idóneo cuando lo que se busca no es obtener un modelo único final sino lo que se pretende alcanzar es una serie de soluciones, de las cuales, según las necesidades del cliente, pueda escogerse una para su aplicación concreta.

Cuando se debe seleccionar una única alternativa el criterio seguido es una ponderación de los distintos objetivos. Durante el proceso de diseño es habitual que se modifiquen los requerimientos proporcionados por el cliente o el diseñador, es decir, se cambia la ponderación de cada uno de los objetivos. En el caso de haberse realizado la optimización con una función con un único objetivo, mediante una combinación lineal de todos los objetivos, un cambio de criterios implica reiniciar todo el proceso de optimización mientras que con la optimización multiobjetivo únicamente implica el seleccionar una alternativa distinta dentro del rango de alternativas generadas.

Capítulo 7

Entorno automático de diseño óptimo en fluidodinámica

A lo largo de esta tesis se han estudiado los distintos aspectos que inciden en el diseño automático en problemas de optimización fluidodinámica. La amplia variedad de peculiaridades específicas que presentan este tipo de problemas junto con su alto coste computacional, impiden la implementación de un entorno de diseño con una estructura rígida válida para todos los problemas que puedan surgir en este ámbito. Sin embargo si que es posible abordar el problema de diseño automático en un conjunto de módulos o bloques que permitan obtener la mejor eficiencia en cada problema de forma estructurada y formal. Así, cada uno de los módulos implementa distintas estrategias de actuación y permite escoger aquella que mejor se adapte al problema particular que se está tratando.

A través de los diversos experimentos desarrollados en esta tesis se han analizado las principales dificultades de la automatización de estos problemas, de tal forma que se han podido establecer los métodos o procedimientos más adecuados para cada uno. Esta aproximación no resta generalidad al entorno de diseño que se plantea, ya que cada una de las alternativas desarrolladas puede aplicarse a un problema genérico de diseño. Sin embargo, con la finalidad de mejorar el rendimiento del proceso, reducir su coste y plazo, se plantean diversas posibilidades para cada una de las distintas etapas involucradas en el proceso de diseño que se comentan a continuación.

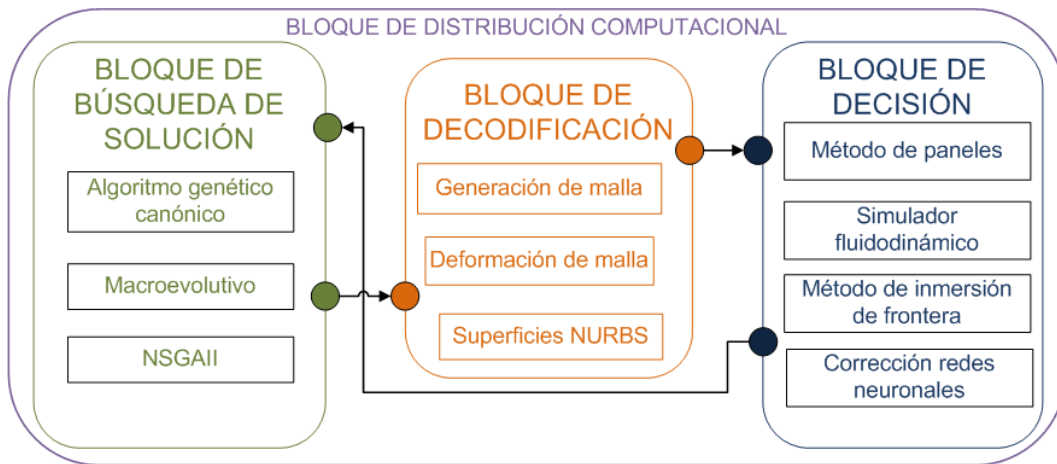


Figura 7.1: Esquema final del entorno automático de diseño

7.1. Proceso de búsqueda

Los problemas de diseño óptimo fluidodinámico suelen caracterizarse por una elevada dimensionalidad y la presencia de numerosos óptimos locales dispersos en las funciones de calidad. Por ello es necesario emplear algoritmos de búsqueda adecuados a esas características. En este sentido, el método de búsqueda condiciona la eficacia del entorno de diseño, ya que determina el número de alternativas que es necesario evaluar para alcanzar el óptimo.

Para este proceso de búsqueda se ha optado por la utilización de algoritmos evolutivos. Si bien dentro de esta categoría se engloban un elevado número de diferentes algoritmos, mediante los distintos experimentos realizados, se ha optado por utilizar aquellos que puedan obtener buenos resultados en el rango más amplio de problemas.

En la búsqueda de generalidad y mejora de la eficiencia se han estudiado distintas alternativas: un algoritmo genético canónico, un algoritmo macroevolutivo y el NSGAII. La selección de los algoritmos se ha basado en la de búsqueda de un equilibrio entre su capacidad de encontrar el óptimo del problema y el número de evaluaciones que requieren para lograrlo. La metodología seguida hace que el entorno de optimización no se restrinja a la utilización de estos algoritmos concretos sino que permita la incorporación de otros nuevos. Por ello, su implementación contempla la posibili-

dad de introducción de procedimientos alternativos y además se ha integrado con la librería de algoritmos evolutivos desarrollada por el Grupo de Sistemas Autónomos de la Universidade da Coruña. De este modo, cualquiera de los algoritmos de esta librería podrá ser utilizado si se considera conveniente para la resolución de un problema determinado.

7.1.1. Algoritmo genérico canónico

El algoritmo genético canónico se presenta como una alternativa sencilla para la búsqueda de soluciones en estos problemas. Las principales dificultades que aparecen cuando se aplica este algoritmo pueden resumirse en:

- Requiere un número elevado de parámetros de configuración, es necesario especificar los procedimientos de selección, mutación y cruce y no es posible establecer un control sencillo del equilibrio entre exploración y explotación.
- Presenta problemas de convergencia prematura o convergencia hacia óptimos locales. Esto sucede especialmente cuando se abordan funciones de calidad muy complejas, en las que el óptimo no está claramente definido, bien por la existencia de numerosos máximos locales o porque estos aparecen muy dispersos en el dominio de búsqueda. Este tipo de estructuras son las habituales en los problemas fluidodinámicos analizados.

Estas dos consideraciones han llevado a no escoger los algoritmos genéticos como la alternativa prioritaria para resolver este tipo de problemas.

7.1.2. Algoritmos macroevolutivos

Los algoritmos macroevolutivos son los que han proporcionado mejores resultados para su aplicación en estos problemas [135], [136]. Frente a los algoritmos genéticos, los macroevolutivos requieren un número menor de parámetros y permiten un control directo de la exploración y la explotación de los resultados. Estos parámetros son el

número de individuos, número de generaciones y el parámetro τ que regula la relación exploración / explotación. Aunque los primeros parámetros tienen una fuerte dependencia del problema concreto, sí que se pueden definir una serie de criterios para ajustar los valores del parámetro τ . A lo largo del proceso evolutivo, conforme se va acercando al óptimo del problema, es necesario incrementar la explotación de los resultados. Sin embargo, debido a la complejidad de los espacios de soluciones, no es conveniente eliminar totalmente la exploración del espacio de búsqueda para evitar que queden regiones del dominio de búsqueda sin explorar.

7.1.3. NSGAII

La transición de algoritmos macroevolutivos al NSGAII supone un cambio significativo en el proceso de búsqueda. Los principales cambios que introduce este algoritmo son:

- Permite analizar simultáneamente varios objetivos.
- El proceso de búsqueda integra el uso de restricciones, tanto rígidas como blandas, en el proceso evolutivo. En los macroevolutivos, al no tener un mecanismo para las restricciones definido, éstas se incorporan mediante una penalización o anulación del resultado de calidad. Sin embargo, en el NSGAII los individuos que no cumplen con restricciones no son penalizados en su calidad, si no que, en el proceso de selección, se sitúan detrás los que cumplen todas las restricciones.
- La introducción de una medida de la diversidad de la población, *crowding-distance*, evita que la resolución del problema se estanque en óptimos locales ya que premia a los individuos más dispares.

Este algoritmo integra herramientas para solventar o reducir las principales dificultades que se han detectado en la aplicación de los algoritmos macroevolutivos. Sin embargo, el NSGAII se ha diseñado para la búsqueda de soluciones en problemas multiobjetivo, de tal forma que no plantea una única solución óptima sino que proporciona un conjunto de soluciones óptimas en el frente de Pareto. Así, al final de este proceso, el diseñador es el que debe escoger cual es la solución que se desarrollará.

7.2. Evaluación de alternativas

En la automatización del proceso de diseño la participación del diseñador es crítica en la selección del procedimiento de evaluación, ya que esta elección determinará la calidad e idoneidad de los resultados y el tiempo / coste computacional requerido para alcanzar los resultados.

Como se ha visto anteriormente, desde la resolución del sistema completo de ecuaciones de Navier-Stokes hasta la resolución del caso bidimensional de flujo potencial pueden aplicarse un amplio abanico de modelos de flujos / fluidos. En la selección del modelo es necesario considerar los efectos de introducir simplificaciones para reducir su coste computacional. La fuerte dependencia del coste computacional del proceso de diseño óptimo con el del proceso de evaluación exige que la elección del modelo deba estudiarse cuidadosamente. Así, de manera similar a cualquier otro proceso de optimización, habrá que buscar un equilibrio entre la precisión de los resultados y el número de alternativas a analizar.

Junto con el sistema de ecuaciones, también como parte de la evaluación, es necesario definir los esquemas numéricos empleados para su resolución. Difícilmente puede establecerse a priori un procedimiento genérico de selección de la mejor alternativa, sólo mediante un estudio específico del problema concreto pueden definirse los esquemas que proporcionen los mejores resultados en relación de calidad y coste computacional.

En las diferentes pruebas realizadas se han utilizado distintos modelos de flujo con la finalidad de verificar el funcionamiento del entorno. Cada uno de los modelos utilizados tiene unas características propias, no sólo relativas al modelo físico asociado sino a la implementación del mismo. Por ello la configuración modular del entorno se ha diseñado para adaptarse a los requerimientos de cada problema específico, integrando cada una de las diferentes alternativas o procedimientos.

Una de las ventajas que presenta el uso de algoritmos evolutivos en el proceso de optimización es que sólo se requiere la ordenación de las alternativas. Esto implica que la selección del simulador no tiene que basarse en que sea cuantitativamente exacto sino que los resultados sean cualitativamente aceptables. Así, es posible introducir

mayores simplificaciones en los modelos utilizados y, con ello, reducir considerablemente el coste computacional del proceso de evaluación.

Sin embargo, en algunos problemas o evaluaciones de alternativas, algunas de las consideraciones tomadas para simplificar el simulador dejan de ser válidas pudiendo introducir grandes errores en los resultados. En estos casos se plantean dos alternativas, la utilización de un simulador más complejo o introducir correcciones adicionales que reduzcan ese error. La primera opción implica aumentar sensiblemente el coste computacional del proceso de evaluación, por lo que la segunda se plantea, inicialmente, cómo la más adecuada para mejorar los resultados del simulador.

De este modo, la selección del procedimiento de corrección ha de basarse fundamentalmente en dos criterios, bajo coste computacional y capacidad para corregir las no linealidades sin perder generalidad. Dentro de las distintas alternativas existentes, las redes neuronales artificiales son las que han proporcionado mejores resultados, ya que éstas han conseguido reducciones muy significativas en el error del simulador con requerimientos computacionales despreciables frente al resto de procesos.

La dificultad que presenta el uso de las redes neuronales es la necesidad de datos reales para entrenarlas y ajustar la corrección. En algunos casos, como son los perfiles aeronáuticos, existe una amplia bibliografía al respecto, sin embargo, en problemas muy específicos, como son las velas, ésto no es posible. Por este motivo, para realizar este tipo de correcciones se han desarrollado ensayos experimentales específicos en los que, combinando técnicas de fotogrametría, mediciones láser, procesado de señales, se han obtenido los datos necesarios para entrenar las redes que corregirán la salida del simulador.

7.3. Decodificación del individuo

El bloque de decodificación del individuo se ha estructurado en dos etapas, una primera de generación de la representación tridimensional de la posible solución y una segunda de mallado. Aunque ambas etapas están fuertemente correlacionadas, las dificultades y requerimientos de cada una de ellas son totalmente distintos.

Respecto al proceso de la generación tridimensional de la alternativa, la selección de sus parámetros y, por tanto, su decodificación, es crítica. Esto se debe a que una parametrización inadecuada puede afectar muy negativamente al proceso de optimización y, especialmente, a la eficiencia del algoritmo búsqueda. Por una parte, el uso de parámetros dependientes o sin una adecuada correspondencia puede incrementar la complejidad de las superficies de búsqueda. Por otra parte, si debido a parametrización escogida o su decodificación se pueden generar elementos no evaluables o degenerados, el proceso de búsqueda tiene que destinar gran parte de sus recursos en eliminar estos elementos en lugar de mejorar el diseño.

En este trabajo se han abordado distintas estrategias para esta decodificación, entre otras, definiendo las superficies utilizando una definición explícita a través de funciones más o menos complejas y utilizando superficies NURBS. Aunque este proceso está fuertemente condicionado por el problema concreto que se aborda, es posible definir dos reglas generales para seleccionar la parametrización:

- Los parámetros han de ser independientes y los menos posibles. Es necesario considerar que la reducción del número de parámetros no puede llevar asociada una reducción de alternativas o de información.
- Cada parámetro ha de tener un significado físico en el problema y tratando que la influencia en la forma final sea similar en todos ellos.

Entre las alternativas evaluadas, es la definición mediante superficies NURBS la que ha ofrecido mejores resultados. La principal ventaja frente otros métodos es que su control se realizan mediante nodos que no son parte de la superficie y, además, su desplazamiento sólo afecta a las zonas de la superficie próximas al nodo en concreto. Así, al contrario que otras definiciones como las bi-splines o funciones polinómicas, un cambio en un parámetro no afecta a todo el diseño sino a una parte del mismo.

Una vez definida la forma de la posible solución es necesario realizar o definir el mallado del dominio para permitir su evaluación. La importancia de cómo se realice este proceso no sólo radica en el coste computacional del proceso sino que de su calidad depende la calidad final de los resultados de la optimización. La calidad de la malla condiciona directamente la calidad global del proceso puesto que los resultados que se

analizan son precisamente los correspondientes a las regiones donde se ha manipulado la malla. En el desarrollo de este bloque han de conjugarse distintos aspectos como son:

- Facilidad de automatización del proceso.
- Moderado coste computacional.
- Consecución de mallas de elevada calidad.

Se han analizado distintas alternativas para este proceso. Éstas pueden agruparse en dos grandes grupos, los métodos basados en la generación de una nueva malla o los basados en la modificación / adaptación de una malla preexistente.

7.3.1. Generación de malla

7.3.1.1. Mallas no estructuradas

La generación de una nueva malla no estructurada se presenta, a priori, como la mejor alternativa para la conseguir la malla asignada a cada posible solución. Esto es debido a su fácil automatización y a la versatilidad de su uso. Sin embargo plantea dos grandes dificultades: su alto coste computacional y la dificultad de controlar el proceso de construcción de la malla.

El coste computacional de este proceso puede reducirse significativamente si la generación de la malla se restringe a un bloque que contiene al objeto mientras que en el resto del dominio se utiliza una malla de referencia generada previamente. Aún así, la dificultad de controlar la posición de los nodos hace que, cuando se opera con formas complejas, surjan elementos degenerados o de mala calidad que perturben la solución obtenida. Debido a todo esto, en el ámbito del entorno automático de diseño aquí desarrollado su uso queda reservado a una última alternativa en el caso de que otro método no sea aplicable.

7.3.1.2. Mallas estructuradas

Las mallas estructuradas se generan subdividiendo el dominio en base a valores constantes de cada una de las direcciones principales. Esto hace que el proceso de generación de la malla sea sencillo con un muy bajo coste computacional. Al poder controlar la distribución del tamaño de las celdas mediante unos pocos parámetros, éstas pueden orientarse en la dirección principal del flujo y refinarse en zonas específicas, permitiendo capturar fenómenos producidos en regiones como la capa límite optimizando el número de celdas. Sin embargo, este método no es fácilmente aplicable a formas complejas ya que ha de ponerse a establecerse una función de transformación sobre el dominio que permita obtener las tres direcciones principales.

La dificultad de adaptarse a geometrías complejas hace que este método sea adecuado para aquellos casos en los que las formas sean sencillas, especialmente en los que aparecen simetrías, como son conductos, perfiles hidrodinámicos, cámaras de combustión, etc. Debido a su bajo coste computacional y a la buena calidad de las mallas generadas esta estrategia de generación de alternativas es la prioritaria a utilizar, sin embargo, las fuertes restricciones a las formas hacen que su campo de aplicación sea reducido.

7.3.2. Deformación de la malla

Mediante el método de deformación de la malla se puede conseguir, con un relativo bajo coste computacional, adaptar la frontera de una malla existente para modificar la frontera a una nueva configuración. Al partir de una malla previa, ésta puede adecuarse para la simulación mediante el refinado de las regiones más importantes y utilizando una malla mas gruesa en aquellas zonas donde los gradientes de velocidad son más pequeños, consiguiendo calidades altas.

Este método se basa en la introducción de un campo de desplazamientos sobre una configuración inicial de la frontera. De este modo, su principal ámbito de aplicación se encuentra en procesos de optimización a partir de un modelo previo. El método de deformación de malla se basa en la resolución de una ecuación de Poisson del campo de desplazamientos. Aunque el método permite grandes desplazamientos, es a pequeños

desplazamientos, del orden de 20 veces el tamaño del elemento, cuando proporciona tiempos de cálculo inferiores a la generación inicial de una malla y preserva su calidad. Además hay que destacar que el uso de este método puede aplicarse también a la resolución de problemas de interacción fluido-estructura, haciendo que se convierta en el más adecuado para la optimización en este tipo de problemas.

7.3.3. Métodos de inmersión de frontera

Para el uso de los métodos de inmersión de frontera sólo se requiere la creación previa de una retícula cartesiana. Partiendo de esta malla cartesiana, cuya creación tienen un mínimo coste computacional. Este método sólo requiere del cálculo de la intersección de la superficie con las celdas existentes de la malla y la determinación de las correspondientes celdas fantasma que lleva asociada.

Mediante este sistema se minimiza el coste computacional de todo el preprocesado de cada una de las alternativas, ya que el cálculo de los puntos de intersección se ve muy simplificado al utilizar una retícula cartesiana. Esto lleva a que este sea el método más adecuado para aquellos problemas en los que el objeto está inmerso en el seno del fluido, como es el caso de las velas, timones, etc.

La principal desventaja de esta estrategia para generar las diferentes alternativas es la imposibilidad de adaptar la malla para capturar fenómenos que requieren una gran resolución, como es la capa límite. Para poder analizar estos fenómenos es necesario refinar el tamaño de todo el bloque que contiene al objeto, aumentando con ello el número de nodos del sistema y, por tanto, incrementando el coste computacional de resolución de las ecuaciones del comportamiento del fluido.

7.3.4. Selección del proceso de mallado

Los métodos basados en la generación de una nueva malla, normalmente permiten generar mallas de alta calidad, sin que aparezcan elementos degenerados. Además, considerando el caso de mallas estructuradas, su coste computacional es bajo compa-

rado con los otros métodos. Sin embargo, cuando se aplican a mallas no estructuradas y fronteras complejas, el control adecuado del proceso automático es difícil y es su coste computacional es muy elevado.

Se han evaluado dos técnicas diferentes para la adaptación de la malla, uno basado en la deformación de la malla y otro basado en el método de inmersión de frontera. Ambos métodos han resultado válidos para los problemas de diseño aerodinámico, pudiéndose considerar la relación entre calidad de la malla y coste computacional equivalente. Así los métodos de deformación de la malla permiten conseguir mallas de alta calidad, adaptadas para capturar fenómenos de capa límite, sin embargo su coste computacional es sensiblemente mayor que los de inmersión de frontera. Este último método reduce el proceso de cálculo de generación de la malla aunque presenta dificultades para capturar los fenómenos próximos a la superficie.

Con los resultados obtenidos no puede establecerse, de forma general, un mejor procedimiento para realizar el proceso de decodificación del individuo. Para la selección del mismo será necesario basarse en los requerimientos de cada problema concreto, tanto por las características del procedimientos de definición del individuo como por los requerimientos de la simulación.

7.4. Procedimiento de diseño

En las secciones anteriores se han resumido el conjunto módulos que conforman en entorno de automatización. A partir de estos resultados es posible definir una estrategia para abordar nuevos problemas de diseño óptimo. La estructura de este proceso sigue el siguiente esquema:

1. En primer lugar es necesario definir el objetivo u objetivos del problema. Atendiendo a este criterio se selecciona el algoritmo de búsqueda requerido, de este modo se construye el módulo de búsqueda. En los casos analizados se han utilizado algoritmos genéticos, algoritmos macroevolutivos y el NSGAI.

2. El segundo paso es establecer el procedimiento para definir la forma del objeto a optimizar, es decir, el bloque de decodificación.
 - 2.1. En una primera fase se requiere desarrollar el método para generar la forma tridimensional del diseño. Este proceso puede realizarse, entre otros, a través de superficies NURBS o funciones polinómicas.
 - 2.2. Definida la superficie es necesario generar la malla asociada. Para ello se puede definir métodos basados en la generación de un nuevo mallado, modificación de uno existente o a través del método de inmersión de frontera.
 - 2.3. Una vez establecido el procedimiento para generar el modelo es necesario especificar que parámetros del mismo serán los que se optimizarán. Éstos serán los que constituyan el cromosoma de cada alternativa.
3. Definidos los bloques de búsqueda y decodificación es necesario establecer el bloque de evaluación. Este proceso se ha estructurado en tres etapas.
 - 3.1. La primera etapa consiste en la definición del simulador fluidodinámico. El objetivo de este análisis es estudiar las simplificaciones que pueden establecerse en el modelo numérico para poder definir un simulador con el menor coste computacional posible.
 - 3.2. Establecido el simulador, se definirá el procedimiento para la adquisición de la malla y la resolución del sistema de ecuaciones.
 - 3.3. Para poder obtener el valor de los objetivos es necesario establecer las herramientas de postprocesado que permitan su evaluación.
4. La última etapa de esta estructura para el diseño óptimo automático la constituye el desarrollo de las estructuras de comunicación entre los distintos bloques desarrollados anteriormente.

Capítulo 8

Conclusiones

En esta tesis se recoge el estudio del proceso de automatización del diseño óptimo en fluidodinámica. Con este objetivo se ha analizado la problemática de estos procesos y se ha desarrollado una metodología para permitir su aplicación práctica. Para ello se han compaginado técnicas de computación evolutiva y mecánica de fluidos computacional con ensayos experimentales y técnicas de inteligencia artificial conexionista. Esto ha supuesto no sólo considerar las implicaciones de su uso de forma aislada, sino también establecer procedimientos para enlazarlos y permitir el intercambio de información entre ellos. Como resultado se ha obtenido un entorno de diseño estructurado en tres módulos diferenciados: el módulo de búsqueda, el módulo de decisión y el módulo de decodificación.

La definición del módulo de búsqueda ha estado fuertemente condicionada por el tipo de problemas de optimización que se han abordado. En primer lugar, las funciones de calidad de estos problemas se caracterizan, de forma general, por poseer óptimos locales dispersos rodeados de regiones de calidad prácticamente constante. En estos casos, para conseguir procesos de búsqueda eficientes, se requiere del uso de algoritmos multipunto que minimicen la posibilidad del estancamiento de la solución en óptimos locales. En segundo lugar, cada problema concreto puede requerir de un proceso de evaluación diferente. Por ello, el algoritmo de búsqueda no puede depender del sistema de evaluación utilizado. Esto es, el procedimiento escogido para calcular la calidad de las posibles soluciones no puede afectar a cómo se realiza el proceso de

búsqueda. Estos dos factores han llevado a que se haya optado por el uso algoritmos evolutivos.

En el caso del estudio de problemas con un único objetivo se ha comenzado con un algoritmo genético canónico dado que es el más utilizado en la bibliografía y puede usarse como referencia para el resto de modelos utilizados. Aunque no ha resultado el más adecuado debido a sus problemas de convergencia prematura y dificultad de control sobre el proceso de exploración y explotación. Para solventar estos problemas y aumentar la eficiencia de la búsqueda se ha optado por el uso de algoritmos macroevolutivos. En las pruebas realizadas, en diseño óptimo de aerogeneradores, velas, timones y formas de carena, este algoritmo se ha mostrado como una solución muy apropiada y ha proporcionado mejoras en todos estos nuevos diseños.

Sin embargo existen un amplio rango de problemas de ingeniería en los que es necesario optimizar simultáneamente varios objetivos. Esto exige un planteamiento distinto del proceso de búsqueda ya que en estos problemas no es posible definir una única solución óptima sino un conjunto de soluciones óptimas o frente de Pareto. Por otra parte estos tipos de problemas suelen requerir introducir restricciones, tanto duras como blandas, en el proceso de diseño, por lo que es deseable que estas se integren en el propio algoritmo de búsqueda. Dentro de los posibles algoritmos que permiten el uso de restricciones en problemas multiobjetivo, se ha escogido el NSGA-II al ser el que ha proporcionado mejor eficiencia. Además, las pruebas realizadas dentro del entorno de optimización, el diseño óptimo de perfiles aerodinámicos, han verificada la adecuación de este algoritmo al caso concreto de la resolución de este tipo de problemas.

En cuanto a la evaluación de los individuos, que en el caso fluidodinámico ha de basarse en la simulación del comportamiento del fluido, es su alto coste computacional el principal elemento que puede hacer que el proceso de optimización no sea viable. La capacidad de cálculo actual hace que, salvo en casos muy concretos, la resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes no sea posible, por lo tanto, ha sido necesario estructurar el sistema de forma que permita integrar distintos simuladores que utilicen modelos más simplificados del comportamiento del fluido. Además el proceso de optimización evolutiva sólo se requiere una ordenación de las alternativas. Así, aunque los resultados del simulador no sean cuantitativamente exactos, mientras sean cualitativamente correctos el resultado de la simulación es aceptable para que el proceso de

optimización alcance sus objetivos. Este criterio ha permitido introducir simplificaciones todavía mayores en el modelado del flujo que reduzcan su coste computacional y, por tanto, hacer computacionalmente viable la optimización.

Puesto que cada problema permite distintas simplificaciones y modelos, el módulo de evaluación se ha diseñado de tal forma que permita integrar cualquier tipo de simulador. De este modo, lo único que se requiere es adaptar la interfaz al simulador concreto de forma que permita la comunicación con el resto de la estructura del entorno. En las pruebas presentadas se han utilizado distintos tipos de simuladores (implementados específicamente, de código abierto y comerciales) y distintos modelos de flujo y fluido (potencial, euler, viscoso y bifase). Por ejemplo, en el diseño de aerogeneradores se ha implementado un simulador propio considerando un flujo potencial, en la optimización de carenas se ha utilizado un simulador de código abierto en un sistema bifásico y, adicionalmente, en el caso de la optimización de velas se ha utilizado un simulador comercial con la consideración de flujo laminar.

Como se acaba de indicar, la reducción del coste computacional de la simulación es crítica y, por tanto, ha de utilizarse el simulador más simple posible. Sin embargo, en algunos casos, los modelos utilizados no recogen fenómenos que pueden modificar, cualitativamente, el valor de la calidad de alguna de las alternativas. Para corregir estas desviaciones sin incrementar significativamente el coste computacional se ha optado por el uso de redes neuronales artificiales para la corrección de los valores proporcionados por los simuladores. Con el objetivo de permitir el entrenamiento y el ajuste de las redes neuronales se han utilizado datos experimentales, en el caso de los perfiles bidimensionales obtenidos de la bibliografía y en las velas mediante ensayos en túnel de viento. Este procedimiento ha permitido la reducción del error desde un 14,5 % a un 5 %, en el caso de los perfiles aerodinámicos y de un 11,54 % hasta 0,23 % en el caso de las velas ensayadas.

Para la realización de los ensayos experimentales se han combinado técnicas de fotogrametría, medición láser y medida y procesado de señales. Estas técnicas han permitido obtener la forma de la vela y las fuerzas aerodinámicas que se generan sobre la misma. El resultado de este proceso ha sido un sistema que permite repetir los ensayos del túnel aerodinámico en el simulador y, con ello, obtener los datos necesarios para el entrenamiento de la red.

En lo relativo a al módulo de decodificación se ha establecido un procedimiento para permitir el intercambio de la información entre los módulos de búsqueda y evaluación. Este proceso se ha estructurado en dos etapas, una de definición de la forma y otra del mallado del dominio. Una de las dificultades de la primera ha sido el pasar de una definición paramétrica de la alternativa, que es con la que opera el módulo de búsqueda, a una representación tridimensional de su forma. Se han utilizado diversos métodos para la definición de la forma: mediante secciones y estas mediante splines o segmentos y la utilización de funciones polinómicas. Sin embargo estos procedimientos requieren de un proceso complejo de parametrización y control de las superficies, especialmente cuando se quiere conocer la influencia de cada uno de los parámetros sobre la forma. Por este motivo, es el uso de superficies NURBS el que ha resultado el método más adecuado para el tipo de problemas abordado. La ventaja de estas superficies es que, al definirse mediante un conjunto de nodos de control que no forman parte de la superficie, su parametrización es sencilla. Estos nodos operan como puntos atractores de la superficie y su desplazamiento afecta únicamente a las regiones más próximas al nodo, de este modo es posible evaluar de forma sencilla la influencia de cada uno sobre la forma final y facilita la elección del número más adecuado de parámetros.

Una vez definida la forma de la alternativa es necesario realizar la discretización del dominio para permitir su evaluación mediante el simulador. Debido a la complejidad de esta tarea y el alto coste computacional de la misma, no se ha determinado una alternativa única para el procedimiento de mallado, planteándose un conjunto de alternativas que, atendiendo a las características propias del problema concreto, permita escoger la más eficiente. Desde el punto de vista de coste computacional los procedimientos pueden ordenarse de menor a mayor como: generación de una malla estructurada, métodos de inmersión de frontera, métodos de desplazamiento de malla y generación de una malla no estructurada. La opción más adecuada sería siempre el procedimiento de menor coste computacional, sin embargo esto no es siempre posible debido a las características propias de cada uno de estos métodos. Así, el método de generación de una malla estructurada tiene su uso muy restringido a formas muy sencillas y, por tanto, no es aplicable a formas complejas. Esta limitación no afecta al método de inmersión de frontera, sin embargo, puesto que hace uso de una malla cartesiana, no permite adaptar el tamaño de las celdas y su orientación en la inmediaciones

del objeto. Como consecuencia se dificulta la captura de algunos fenómenos, especialmente los que ocurren en la capa límite. Este inconveniente es solventado por los métodos de desplazamiento de malla, sin embargo, cuando la deformación necesaria es muy grande, su coste puede ser superior al de la generación de una nueva malla.

Los tres módulos anteriores, módulo de búsqueda, módulo de evaluación y módulo de decodificación, constituyen un entorno de diseño automático aplicable al problema de diseño óptimo en fluidodinámica. Esta estructura no se plantea cómo una solución para un caso concreto sino como una herramienta genérica que puede adecuarse a las necesidades particulares de cada problema. Con la finalidad de verificar de su capacidad de adaptación para permitir su aplicación práctica, cada una de las distintas alternativas planteadas se ha ensayado un problema real de ingeniería. Gran parte de estos experimentos se han realizado dentro de proyectos de investigación solicitados por empresas o entidades públicas en problemas de diseño óptimo de velas, timones y aerogeneradores. En todos estos casos se han conseguido mejorar las características de los modelos de referencia utilizados. Por ejemplo, en el diseño de velas de competición se han mejorado un 4,73 % el parámetro de calidad frente al modelo de referencia y en el diseño de timones un 68,7 %. Un segundo grupo de problemas lo forman el diseño de carenas y la optimización multiobjetivo de perfiles aerodinámicos. El objetivo de estos ensayos, además de mejorar los diseños de partida, era servir como base para nuevos proyectos de mayor envergadura y para abrir nuevas líneas de trabajo. En ellos, se ha verificado la capacidad de la estructura propuesta para afrontar problemas de muy elevado coste computacional de simulación e integrar el tratamiento de múltiples objetivos y restricciones en el proceso de optimización.

Capítulo 9

Líneas futuras de trabajo

El trabajo realizado ha llevado al desarrollo de un entorno de optimización automático para problemas de fluidodinámica. Sin embargo este trabajo no puede considerarse como un final de una línea de investigación, sino como un inicio para una línea de trabajo que, debido a su carácter interdisciplinar, permitir profundizar en cada una de las áreas de conocimiento involucradas y en su aplicación a distintos problemas reales de ingeniería.

Este último punto debe tenerse muy presente ya que esta tesis no se ha desarrollado como una aproximación teórica, sino como una búsqueda de soluciones a problemas reales. En esta búsqueda de aplicación a casos reales se han ido detectando deficiencias y necesidades adicionales de la metodología de diseño inicial. Es por ello que el trabajo futuro que se plantea no implica únicamente mejoras en los procesos de búsqueda y simulación, sino facilitar su aplicación en nuevos problemas.

Esto supone que las futuras líneas de trabajo puedan resumirse en los siguientes puntos:

- Las necesidades específicas de cada problema puede hacer que existan otros algoritmos de búsqueda más eficientes. Por ello la incorporación de una librería de algoritmos, en una primera etapa únicamente evolutivos, ampliando la oferta de algoritmos y, con ello, mejorando la eficiencia de la exploración del espacio de búsqueda parece una aproximación necesaria.

- El uso de simuladores de código abierto permite optimizar el comportamiento del entorno y reducir el tiempo de cómputo requerido para el proceso de optimización. Como acciones futuras se pretende incrementar la integración del simulador, facilitando procesos de adaptación de malla, paralelización de la simulación así como la creación de modelos propios específicos para el problema considerado.
- Desarrollo de un marco de trabajo que permita al diseñador configurar el conjunto de parámetros que intervienen en el proceso de optimización. Permitiendo, de una forma sencilla seleccionar entre los distintos algoritmos de búsqueda y modelos de simulación posibles.

En los problemas específicos abordados en esta tesis, concretamente en los problemas de diseño de velas de competición y de timones, se han obtenido resultados numéricos que proporcionan soluciones de mayor eficiencia. En la siguiente fase que se inicia ahora, se retomará este trabajo para llegar a la construcción de los resultados aquí obtenidos y analizar los resultados reales alcanzados.

Bibliografía

- [1] Norton, R.L. *Diseño de máquinas*. Prentice Hall, Méjico, 1999.
- [2] Lighthil, M. J. *A new method of two-dimensional aerodynamic design*. R-M 1111, Aeronautical Research Council, 1945.
- [3] Lions, J.L. *Optimal Control of Systems Governed by Partial Differential Equations*. Springer-Verlag, 1971.
- [4] Pironneau, O. On optimum design in fluid mechanics. *J. of Fluid Mechanics*,, 64:97–110, 1974.
- [5] A. R. Eide. *Introduction to engineering design*. McGraw-Hill, Singapur, 1998.
- [6] C. L. Dym. *El proceso de diseño en ingeniería*. Limusa Wiley, Mexico D.F., 2002.
- [7] N. Bayazit. Investigating design: A review of forty years of design research. *Design Issues*, 20(1), 2004.
- [8] Jones, J.C. and Thornely, D. *Conference on Design Methods*. Pergamon Press, Oxford, 1963.
- [9] Asimov, M. *Introduction to Engineering Design*. MacGraw-Hill, New York, 1966.
- [10] Archer, L.B. *The Structure of Design Processes*. Royal College of Art, London, 1968.
- [11] Taboada, E. and Nápoli, R. *El diseño industrial*. Centro editor de América Latina, Buenos Aires, 1977.

- [12] Dym, C. L. and Little, P. *Engineering Design: A Project-Based Introduction*. John Wiley, 1999.
- [13] Ertas, A. and Jones, J. C. *The Engineering Design Process*. John Wiley and Sons, New York, 1996.
- [14] Sanders, M. S. and McCormick, E. J. *Human Factors in Engineering and Design*. McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [15] Hyman, B. *Fundamental of Engineering Design*. Prentice Hall, 1998.
- [16] Lumsdaine, E., Lumsdaine, M., and Shelnutt, J. W. *Creative Problem Solving and Engineering Design*. McGraw-Hill, Inc., 1999.
- [17] Ashley, S. Rapid prototyping systems. *Mechanical Engineering*, 113(4):34–43, 1991.
- [18] M.F. Jacome and S.W. Director. Design process management for cad frameworks. *Design Automation Conference, 1992. Proceedings., 29th ACM/IEEE*, pages 500–505, Jun 1992.
- [19] T.A. Montgomery, D.R. Pugh, S.T. Leedham, and S.R. Twitchett. Fmea automation for the complete design process. *Reliability and Maintainability Symposium, 1996 Proceedings. 'International Symposium on Product Quality and Integrity', Annual*, pages 30–36, Jan 1996.
- [20] Miller, Ronald E. *Optimization: foundations and applications*. John Wiley & Sons, 2000.
- [21] Mohammadi, B. and Pironneau, O. Shape optimization in fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36:255–279, 2004.
- [22] Jameson, A. Aerodynamic design and optimization. In *16th AIAA Comput. Fluid Dynamics Conf.*, pages AIAA–2003–3438, Orlando, 2003.
- [23] Reuther, J., Jameson, A., Farmer, J., and Martinelli, L. Aerodynamic shape optimization of complex aircraft configurations via an adjoint formulation. In *AIAA 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, pages AIAA–1996–0094, 1996.

- [24] Alonso, JJ., Kroo, IM., and Jameson, A. Advanced algorithms for design and optimization of quiet supersonic platforms. In *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.*, pages AIAA–2002–0144, Reno, 2002.
- [25] Becache, E., Chaigne, A., Derveaux, G., and Joly P. Numerical simulation of a guitar. In *Proc. Eur. Conf. Comput. Mech*, Krakow, 2001.
- [26] L. Lohner. *Applied Computational Fluid Dynamics Techniques: An Introduction Based on Finite Element Methods*. John Wiley and Sons, 2001.
- [27] Pironneau, O. Optimal shape design by local boundary variations. *Lecture Notes in Mathematics*, 1740:343–384, 2000.
- [28] J. Hadamard. *Lessons on the Calculus of Variation*. Gauthier-Villards, Paris, 1910.
- [29] Hicks, R.M. and Henne, P.A. Wing design by numerical optimization. *Journal of Aircraft*, 15:407–412, 1978.
- [30] Cea, J. and Gioan, A. and Micel, J. Some results on domain identification. *Calcolo*, 3(4), 1973.
- [31] Pironneau, O. On optimal shapes for stokes flow. *J. of Fluid Mechanics*, 70(2):331–40, 1973.
- [32] Nadarajah, S. K. *The discrete adjoint approach to aerodynamic shape optimization*. PhD thesis, University of Stanford, 2003.
- [33] Jameson, A. Aerodynamic design via control theory. In *J. of Scientific Computing*, 3:233–260, 1988.
- [34] Elliott, J. and Peraire, J. Aerodynamic design using unstructured meshes. In *27th Fluid Dynamics Conference*, pages AIAA–1996–1941, New Orleans, 1996.
- [35] J.D. Schaffer. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. In *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms*, pages 93 – 100, 1985.

- [36] Gen, M. and Cheng, R. . *Genetic Algorithms and Engineering Design*. John Wiley and Sons, 1997.
- [37] Husbands, P., Jenny, G., McIlhagga, M., and Ives, R. Two applications of genetic algorithms to component design. In Lecture Notes in Computer Science, editor, *Selected Papers from AISB Workshop on Evolutionary Computing*, volume 1143, pages 50–61, 1996.
- [38] Eby, D. An injection island ga for flywheel design optimization. In *5th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing EUFIT*, pages 687–691, 1997.
- [39] S. Obayashi. Aerodynamic optimization with evolutionary algorithms. *Control '96, UKACC International Conference on (Conf. Publ. No. 427)*, 1:687–692 vol.1, Sept. 1996.
- [40] Jameson, A. and Vassberg, J.C. Computational fluid dynamics for aerodynamic design: Its current and future impact. In *39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, pages AIAA–2001–0538, Reno, Nevada, 2001.
- [41] Díaz Casás, V., Duro, R.J., and Lopez Peña, F. Evolutionary design of wind turbine blades. *International Scientific Journal of Computing*, 4:49–55, 2005.
- [42] Bachelor, G.K. *An Introduction to fluid dynamics*. Press Syndicate of the University of Cambridge, 2000.
- [43] Wilcox, D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. 1998.
- [44] Mohammadi, B. and Pironneau, O. *Analysis of the k- ϵ turbulence model*. Wiley, 1993.
- [45] Wiener, N. *Cibernetics for Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1948.
- [46] John H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992.
- [47] J. Holland. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. PrUniversity of Michigan Press, 1975.

- [48] Whitley, D. The genitor algorithm and selection pressure: Why rank-based allocation of reproductive trials is best. *Proc. 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms.*, pages 116–121, 1989.
- [49] Goldberg, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [50] Schaffer, J. D. and Morishima, A. An adaptive crossover distribution mechanism for genetic algorithms. In *Proc. 2nd Int. Conf. on Genetic Algorithms and Their Applications*, page 36–40, 1987.
- [51] Spears, W. M. and De Jong, K. A. An analysis of multi-point crossover. *Foundations of Genetic Algorithms*, 1:301–315, 1991.
- [52] G. Sywerda. Uniform crossover in genetic algorithms. In *Proceedings of the third international conference on Genetic algorithms*, 1989.
- [53] JR Koza. *Genetic Programming*. Brad Ford, Cambridge, Massachusetts, 1994.
- [54] David B. Fogel. *Evolutionary computation: toward a new philosophy of machine intelligence*. IEEE Press, 1995.
- [55] Katz, J. and Plotkin, A. *Low Speed Aerodynamics*. Cambridge Aerospace Series. Cambridge University Press, 2001.
- [56] Hess, J. L and Smith, A. M. O. Calculation of potencial flow about arbitrary bodies. Technical report, Douglas Aircraft Company, Aircraft Division, 1966.
- [57] J.L Hess. Panel methods in computational fluid dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 22:255–274, 1990.
- [58] Thwaites, B. On the momentum equation in laminar boundary layer flow. *ARC RM*, 2587, 1952.
- [59] T. Cebeci and A. M. O. Smith. Analysis of turbulent boundary layers. *NASA STI/Recon Technical Report A*, 75:46513–+, 1974.
- [60] Head, M. R. Entrainment in the turbulent boundary layers. *ARC RM*, 3152, 1958.

- [61] Hansen, Martin O. L. *Aerodynamics of Wind Turbines*. Science Publishers, 2000.
- [62] Moores, J. *Potential Flow 2-Dimensional Vortex Panel Model: Applications to Wing-mills*. PhD thesis, Faculty of Applied Science and Engineering. University of Toronto, 2003.
- [63] H. Schlichting. *Boundary-Layer Theory*. Series in Mechanical Engineering. McGraw-Hill, 1979.
- [64] Thwaites, B. *Approximate Calculation of the Laminar Boundary Layer*. Royal Aeronautical Society, 1949.
- [65] Cebeci, T.; and Bradshaw, P. *Momentum transfer in boundary layers*. Hemisphere Publishing Corp., 1977.
- [66] Richard M. Golden. *Mathematical Methods for Neural Network Analysis and Design*. Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [67] Zhang, G., Patuwo, B. E. , and Hu, M. Y. . Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. *International Journal of Forecasting*, 14:35–62, 1998.
- [68] Abbot, H.; and Von Doenhoff, Albert E. . *Theory of Wing Sections*. Dover, 1949.
- [69] Moores, John. *Potential Flow 2-Dimensional Vortex Panel Model: Applications to Wingmills*. PhD thesis, University of Toronto, 2003.
- [70] W. Z. Shen, R. Mikkelsen, J.Ñ. Sørensen, and C. Bak. Tip loss corrections for wind turbine computations. *Wind Energy*, 8(4):457–475, 2005.
- [71] Goldstein, S. On the vortex theory of screw propellers. In *Proceedings of the Royal Society*, volume 123A, page 440–465, 1929.
- [72] Glauert, H. *Airplane propellers*. In *Aerodynamic Theory*. Durand WF, 1963.
- [73] Wilson, R. and Lissaman, P. Applied aerodynamics of wind power machines. Report nsf/ra/n-74113, Oregon State University, 1974.

- [74] De Vries, O. Fluid dynamic aspects of wind energy conversion. Agard report ag-243, Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1979.
- [75] Santos, J., Duro, R.J., Becerra, J.A., Crespo, J.L., and Bellas F. Considerations in the application of evolution to the generation of robot controllers. *Information Sciences*, 133:127–148, 2001.
- [76] Marín, J. and Solé, R.V. . Macroevoolutionary algorithms: A new optimization method on fitness landscapes. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 4:272–286, 1999.
- [77] De Jong, K.A. *An Analysis of the Behavior of a Class of a Genetic Adaptive Systems*. PhD thesis, University of Michigan, 1975.
- [78] Solé, R.V. Modelling macroevolutionary patterns: An ecological perspective. *Biological Evolution and Statistical Physics*, 585:312–337, 2002.
- [79] Ferziger, J.H. and M. Peric. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 2002.
- [80] Godlewski, E. and Raviart, R. *Numerial Approximation of Hyperbolic Systems of Conservation Laws*. Springer, 1991.
- [81] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method*. Prentice Hall, 2007.
- [82] Whitlow, D. and Chattot, J.J. A finite volume least-squares method. *J. Comp. Fluid Dynamics*, 11(4):392–410, 2003.
- [83] Issa, R.I. Solition of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *J. of Computatinal Physics*, pages 40–65, 1986.
- [84] A. Martínez. Modelado e simulación de timones articulados. Dea - report, Departamento de Ingeniería Naval y Oceánica, Ferrol, España, 2008.
- [85] Bottasso, C.L., Detomi, D., and Serra, R. The ball-vextex method: a simple spring analogy for unstructure dynamic meshes. *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 194:4244–4264, 2005.

- [86] Bermudez de Castro, A., Seoane, M.L., and J. Porto. Optimización de velas mediante simulación numérica. Technical report, Universidades de Santiago de Compostela, 2006.
- [87] Blom, F. Considerations on the spring analogy. *Int. J. Num. Meth Fluids*, 32:647–668, 2000.
- [88] Lahner, R. and Yang, C. Computational mechanical improved ALE mesh velocities for moving bodies. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 12:599 – 608, 1996.
- [89] Masud, A. and Hughes, T. A space-time Galerkin/least-squares finite element formulation of the Navier-Stokes equations for moving domain problems. *Comput. Methods Appl. Mech Eng.*, 146:91–126, 1997.
- [90] Robertson, I. and Sherwin, S. Free-surface flow simulation using hp/spectral elements. *J. Comp. Physics*, 155(28):26–53, 1999.
- [91] Jasak, H. *Error analysis and estimation in the finite volume method with applications to fluid flows*. PhD thesis, Imperial College, University of London, 1996.
- [92] Farhat, C. and Degand, C., Koobus, B., and Lesoinne, M. Torsional springs for two-dimensional dynamic unstructured fluid meshes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 163(1-4):163, 1998.
- [93] Oliveira, P.J. Computer modelling of multidimensional multiphase flow and application to t-junctions. Technical report, Imperial College, 1992.
- [94] Ishii, M. *Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow*. Eyrolles, 1975.
- [95] Weller, H. G. Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase. Technical report, Nabla Ltd., 2002.
- [96] Hill, D.P. . *The Computer Simulation of Dispersed Two-Phase Flows*. PhD thesis, University of London : Imperial College, 1998.
- [97] Dopazo, C. On conditional averages for intermittent turbulent. *J. Fluid Dynamics*, 81:433–438, 1977.

- [98] Gosman, A.D. Multidimensional modelling of turbulent two-phase. *AIChE J.*, 38(12):1946–1956, 1992.
- [99] García, J., Oñate, E., and Sierra, H. Un método de elementos finitos para análisis hidrodinámico de estructuras navales. *Monografía CIMNE*, 2000.
- [100] Quarteroni, A. and Parolini, N. Mathematical models and numerical simulations for the america cup. *Comput Methods Appl. Mech. Eng.*, 194:1001–1026, 2005.
- [101] Doyle, T., Gerritsen M., and Iaccarino, G. Towards sail shape optimization of a modern clipper ship. *Annual Research Briefs, Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford Univ.*, 2002.
- [102] Míguez González, M., Díaz Casas, V., and López Peña, F. and Duro, R.J. Buques de pesca y eficiencia energetica: Proyecto peixe verde. In *46º Congreso de Ingeniería Naval e Ingeniería Marítima*, Sevilla, 2007.
- [103] A. Mancuso. Parametric design of sailing hull shapes. *Ocean Engineering*, 33(2):234–246, February 2006.
- [104] Peskin, C.S. Flow patterns around heart valves: a numerical method. *J. Comput. Phys.*, 10:252–271, 1972.
- [105] Mulas, M. and Talice, M. Assessment of the immersed boundary technique for compressible cfd codes. *Proceedings of the Third International Conference on Computational Fluid Dynamics*, 2004.
- [106] Goldstein, D., Handler, R., and Sirovich, L. Modeling a no slip flow boundary with an external force field. *J. Computer Phys.*, 105:354–366, 1993.
- [107] Saiki, E.M. and Biringen, S. Numerical simulation of a cylinder in uniform flow: application of a virtual boundary method. *J. Comput. Phys.*, 123:450–465, 1996.
- [108] Pember, R.B., Bell, J.B., Colella, P., and Crutfield, W.Y. An adaptive cartesian grid method for unsteady compressible flow in irregular regions. *J. Comput. Phys.*, 120(2):278–304, 1995.

- [109] McKenney, A. and Greengard, L. and Mayo, A. A fast poisson solver for complex geometries. *J. Comput. Phys.*, 118(2):348–355, 1995.
- [110] Calhoun, D. and LeVeque, R.J. A cartesian grid finite-volume method for the advection-difusion equation in irregular geometries. *J. Comput. Phys.*, 157(1):143–180, 2000.
- [111] Calhoun, D. A cartesian grid method for solving the two-dimensional streamfunction-vorticity equations in irregular regions. *J. Comput. Phys.*, 176(2):231–275, 2002.
- [112] Kim, J. and Moin, P. Application of a fractional-step method to incompressible navier-stokes equations. *J. Comput. Phys.*, 59:308–323, 1985.
- [113] Fadlun, E., Verzicco, R., Orlandi, P., and Mohd-Yusof, J. Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulations. *J. Comput. Phys.*, 161:30–60, 2000.
- [114] Verzicco, R., Iaccarino, G., Fatica, M., and Orlandi, P. Flow in an impeller stirred tank using an immersed boundary method. *NASA Ames Research Center/Stanford University Center for Turbulence Research*, pages 251–261, 2000.
- [115] Fedkiw, R.P. Coupling an eulerian fluid calculation to a lagrangian solid calculation with the ghost fluid method. *J. Comput. Phys.*, 175:200–224, 2002.
- [116] Fedkiw, R.P., Aslam, T., Merriman, B., and Osher, S. A non-oscillatory eulerian approach to interfaces in multimaterial flows (the ghost fluid method). *J. Comput. Phys.*, 152:457–492, 1999.
- [117] Richards, P. J. and Hoxey, R. P. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k - \epsilon$ turbulence model. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 46:145–153, 1993.
- [118] Ferziger, J.H. Large eddy numerical simulations of turbulent flows. *AIAA*, pages 76–147, 1976.
- [119] Flay, R. A twisted flow wind tunnel for testing yacht sails. *J Wind Eng.*, 63:171–182, 1996.

- [120] O Jackson, Thomas. *Handbook of Neural Computation*, chapter Data complexity and separability, pages B4.2 1–5. 1997.
- [121] M. Mulas e M. Talice G. Delussu. Simulazione al computer delle andature portanti e di bolina. *Superyacht*, 2005.
- [122] Schaffer, J. David. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms. *Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithms*, pages 93–100, 1985.
- [123] Srinivas, N. and Deb, K. Multiobjective function optimization using nondominated sorting genetic algorithms. *Evol. Comput.*, 2(3):221–248, 1995.
- [124] Horn, J., Nafploitis, N., and Goldberg, D.E. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, page 82–87, 1994.
- [125] Fonseca, C.M. and Fleming, P.J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, page 416–423, 1993.
- [126] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2):182–197, 2002.
- [127] Zitzler, E., Laumanns, M. , and Thiele, L. Spea2: Improving the strength pareto evolutionary algorithm. Technical report, Swiss Federal Institute of Technology, 2001.
- [128] Zitzler, E. *Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications*. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology, 1999.
- [129] Coello Coello, C.A. and Toscano Pulido, G. A micro-genetic algorithm for multiobjective optimization. In *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, volume 1993, page 126–140. Springer-Verlag, 2001.

- [130] Coello Coello, C.A. and Toscano Pulido, G. Multiobjective optimization using a micro-genetic algorithm. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'2001)*, page 274–282. Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [131] Coello, C., Van Veldhuizen, D., and Lamont, G. *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*. Kluwer Academic Publishers, 2007.
- [132] Coello, C. and Lamont, G. Applications of multi-objective evolutionary algorithms. *World Scientific*, 2004.
- [133] Huang, V. L., Qin, A. K., Deb, K., Zitzler, E., Suganthan, P.N., Liang, J.J., Preuss, M., and Huband, S. Problem definitions for performance assessment of multi-objective optimization algorithms. Technical report, Technological University, 2007.
- [134] P.N. Suganthan. Special session on constrained real-parameter optimization, cec (2007). Technical report.
- [135] Becerra, J.A. , Díaz Casás, V., and Duro, R.J. Exploring macroevolutionary algorithms: Some extensions and improvements. *Lecture Notes in Computer Science*, 4507:308–315, 2007.
- [136] Caamaño, P. and Bellas, F. and Becerra, J.A. and Duro, R.J. Application domain study of evolutionary algorithms in optimization problems. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pages 495–502, 2008.

.

